

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Sistema Especialista de Apoio ao Controle
Tensão/Potência Reativa, Incluindo Manobras
Sobre a Topologia da Rede**

Tese Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica (Dr. Eng.)

JACQUELINE GISÈLE ROLIM

Florianópolis, abril de 1995


**Sistema Especialista de Apoio ao Controle Tensão/Potência Reativa,
Incluindo Manobras sobre a Topologia da Rede**

JACQUELINE GISELE ROLIM

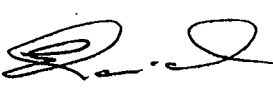
"Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA,

e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação."




Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.
Orientador

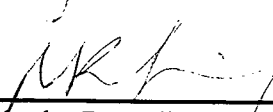


Ênio Valmor Kassick, Dr.
Coordenador de Pós-Graduação

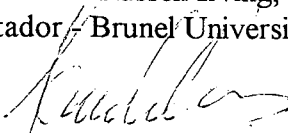
BANCA EXAMINADORA



Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.
Orientador



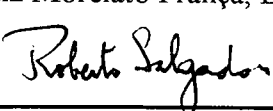
Malcolm Russell Irving, Ph.D.
Co-orientador - Brunel University - Inglaterra



Germano Lambert Torres, Ph.D.



André Luiz Morelato França, Dr. Eng. Eletr.



Roberto de Souza Salgado, Ph.D.



Hans Helmut Zürn, Ph.D.

RESUMO

A correção em violações nos níveis de tensão, mesmo em modernos centros de gerenciamento da operação existentes hoje em dia, costuma ser feita ainda na base da tentativa e erro. Desta forma o operador, baseado em sua experiência, seleciona controles que ele julga os mais apropriados para corrigir eventuais problemas de sub ou sobretensão no sistema.

Este trabalho propõe o uso de um sistema baseado no conhecimento, chamado SECTE (Sistema Especialista para Controle de Tensão), para apoiar o operador nesta tarefa, sugerindo os controles mais sensíveis para corrigir uma determinada violação. Esta seleção é feita baseada em sensibilidades dos controles x barras de carga, calculadas em um programa em FORTRAN, enquanto o SECTE foi desenvolvido em PROLOG. O uso de diferentes linguagens levou a necessidade de desenvolvimento de uma interface entre as linguagens, o que foi feito utilizando-se o ambiente POPLOG.

O SECTE considera como variáveis de controles, selecionadas via sensibilidades, as tensões nas barras de geração e as posições de tap dos transformadores com comutação sob carga. Além destas possibilidades de controle são utilizados os chaveamentos de elementos shunt e, em casos mais extremos, de linhas de transmissão. Para possibilitar uma análise mais rápida do efeito destes chaveamentos no perfil de tensões, foi desenvolvido um programa, também em FORTRAN e baseado em técnicas de diacóptica, que calcula a variação do estado do sistema após o chaveamento de um ramo.

Na etapa de validação do sistema completo foi utilizado o simulador em desenvolvimento no laboratório de sistemas de potência da UFSC (LABSPOT) para geração dos casos teste.

ABSTRACT

The correction of violations in voltage levels, even in modern energy management systems is usually done on a trial and error basis. In that way the operator, based on his experience, selects the controls he thinks are the most appropriate to correct occasional problems of under or overvoltage in the system.

This work proposes the use of a knowledge based system, called SECTE (Expert System for Voltage Control), to support the operator in this task, suggesting the most sensitive controls to correct a specific violation. This selection is done based on the sensitivities of controls versus load buses, which are obtained from a FORTRAN program, while SECTE was developed using PROLOG. The use of different languages lead to the necessity of developing an interface between these languages, using the POPLOG environment.

SECTE uses as controls, selected according to their sensitivities, the voltage at generator buses and the position of transformer taps with on load tap changer. Besides these possibilities, the use of the switching of shunt elements and, in more severe cases, transmission lines are considered. Another FORTRAN program, based on the diakoptics technique, was developed in order to make possible a quicker analysis of the effects of switching over the voltage profile and it calculates the variation of the system state after the switching of a branch.

A simulator, currently under development in the power system laboratory of UFSC (LABSPOT), was used during the validation of the whole system to generate the test cases.

*Ao meu marido, Raimundo, que tive
a felicidade de conhecer neste curso.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Luiz Jairo Branco Machado pela orientação, amizade e entusiasmo demonstrados no decorrer deste trabalho.
- Ao Dr Malcolm R. Irving pela orientação no período na Universidade de Brunel.
- Ao Prof. Roberto Salgado e ao André Della Rocca Medeiros por cederem os programas de fluxo de potência, sensibilidades e otimização do perfil de tensões, em especial ao André pela assistência no uso e compreensão destes programas.
- Ao José Eduardo Giacomelli (UFSC), ao Marcelo Tardio Arze (UFSC) e ao Jeremy Gann (Brunel) pelo auxílio na solução dos problemas computacionais.
- Aos engenheiros Walter Zelindro (CELESC) e Vera Lúcia de Castro Soares (ELETROSUL) pelas informações sobre procedimentos práticos utilizados pelas empresas no controle de tensão.
- À minha família e a família Ghizoni Teive por estarem sempre comigo.
- Aos professores, funcionários e colegas de pós-graduação, em especial aos do Grupo de Sistemas de Potência, pela convivência alegre e produtiva.
- À amiga Maria do Socorro Rangel pelo apoio nas primeiras semanas na Inglaterra.
- À Universidade Federal de Santa Catarina pelos recursos físicos e pelo conhecimento recebido.
- Ao CNPq pela concessão de bolsa e demais recursos necessários ao programa de doutorado sanduíche.
- Ao Conselho Britânico pelo pagamento das taxas na Universidade de Brunel.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Ações de Controle na Operação de Sistemas Elétricos de Potência em Tempo Real.....	01
1.2 - Análise de Segurança em Tempo Real.....	03
1.3 - Influência da Experiência do Operador nas Decisões de Controle.....	05
1.4 - Objetivos e Principais Contribuições deste Trabalho.....	06
1.5 - Organização deste Trabalho.....	07

CAPÍTULO 2 - UTILIZAÇÃO DE MANOBRAS PARA CONTROLE DA REDE

2.1 - Introdução.....	09
2.2 - Revisão Bibliográfica.....	10
2.3 - Formulação do Problema de Seleção de manobras sobre a Topologia da Rede para Alívio de Sobrecargas.....	15
2.4 - Formulação do Problema de Seleção de Manobras sobre a Topologia da Rede para a Correção dos Perfis de Tensão.....	18
2.5 - Restrições à Utilização de Chaveamentos de LT's e TF's.....	22
2.5.1 - Efeitos de Transitórios de Manobras.....	22
2.5.2 - Diminuição da Vida Útil de Disjuntores.....	24
2.5.3 - Redução da Confiabilidade do Sistema Elétrico.....	25
2.6 - Conclusões	26

CAPÍTULO 3 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE DE TENSÃO/ POTÊNCIA REATIVA

3.1 - Introdução.....	28
3.2 - Variáveis de Controle.....	31
3.3 - Exame de Alternativas Existentes na Literatura para Tratar do Problema.....	32
3.4 - Cálculo de Sensibilidades.....	35
3.5 - Conclusões.....	38

CAPÍTULO 4 - SISTEMAS ESPECIALISTAS E SUAS APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

4.1 - Introdução à Inteligência Artificial e Sistemas Baseados no Conhecimento.....	40
4.2 - Estrutura de um Sistema Especialista.....	43
4.3 - Verificação e Validação de um Sistema Especialista.....	51
4.4 - Aplicações em Sistemas de Potência.....	53
4.5 - Conclusões.....	56

CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA APLICADO AO CONTROLE DE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA

5.1 - Introdução.....	58
5.2 - Revisão Bibliográfica.....	59
5.3 - Opções de Projeto.....	62
5.3.1 - Linguagem.....	62
5.3.2 - Aquisição do Conhecimento.....	63
5.3.3 - Representação do Conhecimento.....	64
5.4 - Interface entre o Sistema Especialista e Programas Numéricos.....	68
5.4.1 - Introdução.....	68
5.4.2 - O Sistema POPLOG.....	70
5.4.3 - A Integração SECTE/SENSIB/SIMULA.....	74
5.5 - Conclusões.....	78

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1 - Introdução.....	79
6.2 - Resultados da Simulação de Chaveamentos.....	80
6.3 - Resultados do SECTE.....	86
6.3.1 - Introdução.....	86
6.3.2 - Caso 1 - Sistema New England 39 Barras	87
6.3.3 - Caso 2 - Sistema New England 39 Barras	90
6.3.4 - Caso 3 - Sistema Sul-Sudeste 176 Barras (Simulador)	91
6.3.5 - Caso 4 - Sistema Sul-Sudeste 176 Barras (Simulador)	94
6.3.6 - Caso 5 - Solução Através de Chaveamento - Sistema 176 Barras	100
6.4 - Dificuldades Encontradas no Desenvolvimento deste Trabalho.....	104
6.5 - Conclusões Gerais	107
6.6 - Sugestões para Futuros Trabalhos.....	109

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
--	------------

APÊNDICE A - UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE DIACÓPTICA.....	120
---	------------

APÊNDICE B -SISTEMAS DE DADOS UTILIZADOS.....	122
--	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - AÇÕES DE CONTROLE NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM TEMPO REAL

No dia a dia da operação de sistemas de potência, busca-se atender a carga de maneira confiável, com qualidade e economia.

A questão da confiabilidade está ligada à capacidade do sistema suportar a perda de determinados equipamentos sem que isto leve à perda de carga, enquanto que a qualidade é traduzida por níveis de tensão e frequência dentro dos limites de operação, e a economia pelo controle da distribuição da geração e intercâmbios entre empresas, reduzindo custos.

Várias tarefas são executadas nos centros de controle de operação, os quais são dotados de recursos computacionais e de um sistema de aquisição de dados e comunicações, que permitem que sejam executadas as seguintes funções principais:

- Controle de Geração: alocação da geração, regulação da frequência e intercâmbios,
- Controle Supervisório: apresentação ao operador do centro de controle de informações lógicas e analógicas pré-processadas do sistema de monitoramento (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition),
- Operação em Tempo Real: funções relacionadas à segurança do sistema e controle automático de geração (intercâmbio e frequência). Em maior ou menor grau de automação são aqui incluídas tarefas como:
 - . Configurador de rede - constrói e atualiza o grafo da rede,
 - . Modelador de Rede - a partir do grafo da rede, constrói e atualiza o modelo do sistema,
 - . Estimação de estado - determina o estado (magnitude e ângulo das tensões nodais);

- . Análise de contingências - verifica se o sistema é capaz de suportar um determinado conjunto de contingências;
- . Controle automático de geração - através de um sinal de erro que considera desvios de frequência e intercâmbios, fornece sinais de controle para determinadas unidades geradoras;
- . Despacho econômico - fornece fatores de distribuição que expressam as proporções com que cada unidade geradora, sob controle do CAG (controle automático de geração), deve assumir variações na carga.

O planejamento da operação a curtíssimo prazo (operação semanal e diária) estipula previamente valores horários para a escala das unidades geradoras, configuração da rede e intercâmbios com outras empresas para cada período, baseado na previsão de carga e levando em conta a disponibilidade e limitações dos equipamentos. Esta programação sofre alterações devido à modificação das cargas, modificações nas condições hidrológicas e saídas forçadas [94].

Normalmente na operação são consideradas as seguintes variáveis de controle:

- potência ativa gerada,
- potência reativa gerada,
- magnitude das tensões nas barras de geração,
- magnitude das tensões em dispositivos de geração de potência reativa,
- taps de transformadores,
- fluxos de potência em elos CC e
- corte de carga.

Através da alteração destas variáveis (considerando-se sempre seus limites de capacidade), controla-se:

- magnitude das tensões nas barras de carga,
- potência ativa na barra de folga,
- ângulos de tensão em todas as barras (exceto a de folga) e, conseqüentemente,
- fluxos e perdas nas linhas e transformadores.

A função destes controles pode ser a de eliminar alguma violação em limite operacional, ou otimizar o estado de operação do sistema, com objetivos econômicos ou de segurança.

1.2 - ANÁLISE DE SEGURANÇA EM TEMPO REAL

Durante a operação de sistemas de potência devem ser constantemente verificadas e obedecidas as restrições de carga e de limites operacionais (basicamente fluxo máximo em linhas de transmissão e faixa para magnitude de tensão nas barras).

É importante também observar se estas restrições continuarão a ser atendidas caso ocorra alguma contingência como, por exemplo, a perda de determinada linha de transmissão ou unidade geradora.

Esta análise antecipada faz parte da chamada "análise de segurança", a qual a partir de um ponto inicial de operação simula um conjunto pré-definido de contingências e classifica o estado de operação atual do sistema como, por exemplo, da maneira apresentada na figura 1.1 [90].

No caso do sistema estar operando no nível 2, e dependendo do grau da violação ou violações causada pela contingência, pode ser interessante armazenar-se a solução encontrada para corrigir as eventuais violações, de forma a já tê-la disponível se a contingência vir a ocorrer. Outra possibilidade seria alterar o estado pré-contingência de forma a levá-lo a operar em um estado seguro (nível 1), no entanto esta é uma tarefa cada vez mais difícil se considerarmos sistemas de grande porte e interligados [90].

No presente trabalho os esforços estarão direcionados para as correções no nível 2 (potenciais) ou no nível 4(reais), particularmente nas relativas a violações nos limites de tensão.

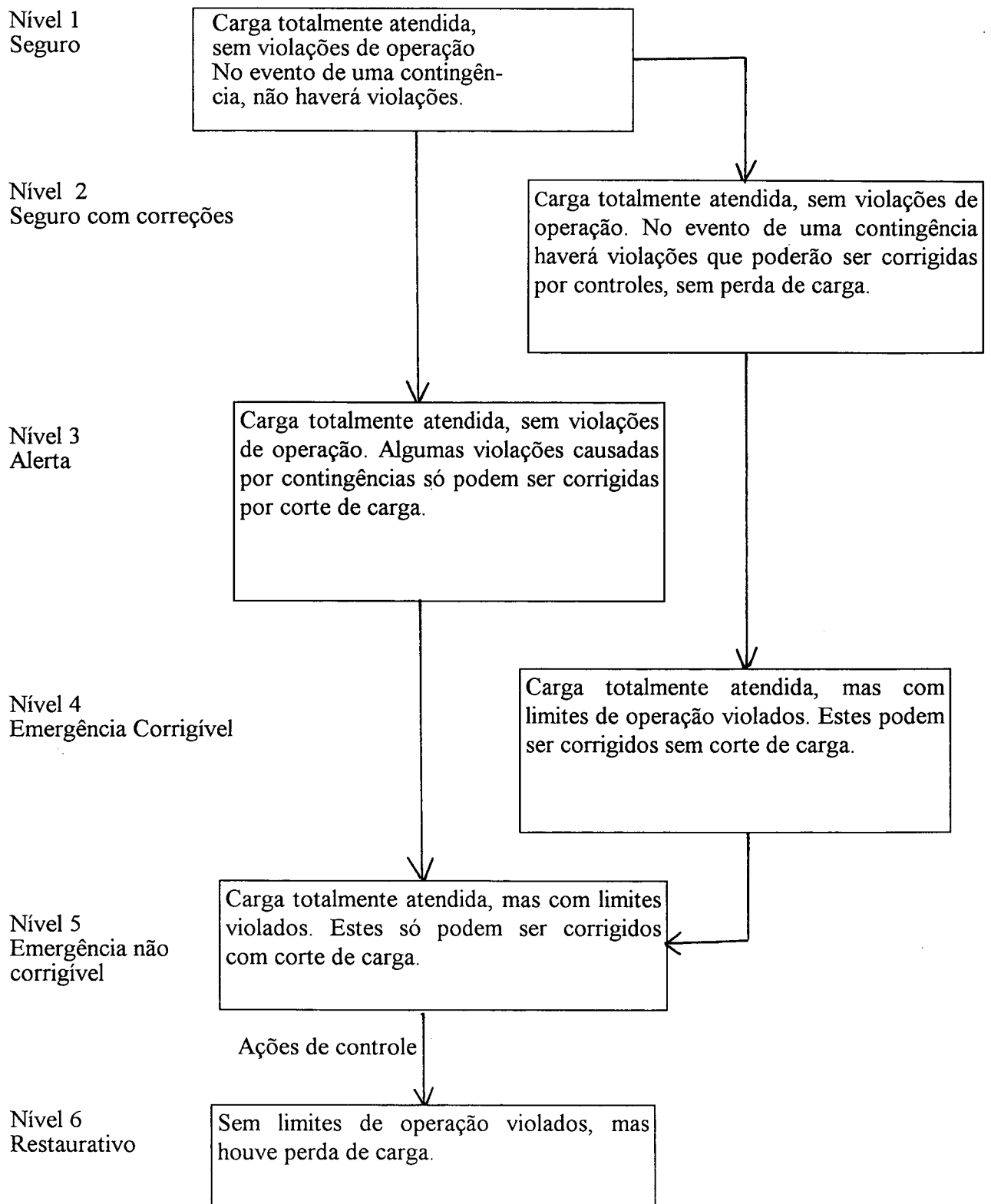


Figura 1.1 - Estado de operação de um sistema de potência.

1.3- INFLUÊNCIA DA EXPERIÊNCIA DO OPERADOR NAS DECISÕES DE CONTROLE

Os despachantes localizados no centro de operações do sistema têm as seguintes funções básicas [94]:

- controle de tensão:
 - . atuação sobre LTC's remotamente,
 - . solicitação às unidades e outras empresas para providências.
- controle de carga e frequência:
 - . atuação sobre CAG,
 - . redespacho de usinas,
 - . reprogramações.
- controle de serviços:
 - . preparação do sistema,
 - . autorização de manobras,
 - . liberação dos serviços,
 - . acionamento da manutenção.
- coleta de dados:
 - . preenchimento de planilhas,
 - . emissão de relatórios.
- recomposição do sistema.

Estas tarefas são executadas de acordo com programações, instruções e manuais de operação recebidos previamente pelos despachantes.

Relacionados ao sistema sul/sudeste brasileiro (ELETROSUL) existem, por exemplo, procedimentos elaborados pelo GCOI (Grupo Coordenador da Operação Interligada). Estas instruções possuem grande volume de informações, como faixas de controle de tensão por período de carga, limites de fluxo nas interligações e procedimentos a serem seguidos quando houver perda de determinado equipamento (em período de carga pesada, média ou leve), inclusive corte de carga e recomposição do sistema.

Muitas vezes, face às situações de emergência, o operador toma uma decisão não apropriada que acaba provocando o agravamento da situação, ocorrência que vem a ser chamada posteriormente de "falha humana".

Esta situação tende a agravar-se com o crescimento dos sistemas, e conseqüente aumento da complexidade, e com a operação de muitas redes em estado próximo ao limite de capacidade. Além destes fatores, estudos mostram [33] que o tempo médio de experiência dos operadores vem diminuindo, assim como o número de oportunidades de lidar com contingências severas.

Em modernos centros de gerenciamento de energia (EMS) o operador conta com várias ferramentas numéricas disponíveis, mas ainda cabe a ele grande parte das decisões, como verificação da seqüência correta de chaveamentos e processamento de alarmes.

Observa-se então que seria útil extrair o conhecimento qualitativo, incluído nos manuais e obtido da experiência passada de operadores, de maneira que o mesmo estivesse disponível em situações onde o operador necessitasse de suporte. Este conhecimento seria armazenado e manipulado pelos denominados "sistemas especialistas" a serem introduzidos no capítulo 4. Estes sistemas podem ser utilizados para aliviar o operador de tarefas rotineiras e/ou auxiliá-lo em situações de emergência, e evitam a perda do conhecimento adquirido durante anos de experiência dos operadores no momento da aposentadoria.

1.4 - OBJETIVOS E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema especialista, ou seja, um sistema que dê soluções similares às que um especialista encontraria, para controle de tensão/potência reativa.

Este é um sistema híbrido, que coordena a utilização de alguns algoritmos numéricos disponíveis, em FORTRAN, com um sistema baseado no conhecimento, em PROLOG, que considera heurísticas observadas em manuais de operação ou em testes sobre o comportamento do sistema.

Além dos controles usuais, como tensão de geração e taps de transformadores, é incluído tratamento para a retirada de linhas em período de carga leve para controle de sobretensões, prática prevista nas instruções de operação do sistema sul/sudeste brasileiro [101]. O chaveamento de elementos shunt também é tratado através de regras. Para possibilitar uma verificação rápida do efeito destes chaveamentos no perfil de tensões foi desenvolvido um método de simulação baseado na técnica de diacóptica.

Desta forma o operador tem disponível, para cada tipo e localização de violação de tensão, a ferramenta mais eficaz para controle e indicações de quanto a mesma precisa ser alterada. Na versão completa, com interface entre FORTRAN/PROLOG, o próprio sistema especialista faz uma verificação da solução apresentada chamando um Fluxo de Potência completo e apresentando os resultados ao operador.

Além da utilização para solução em situações reais, este sistema pode fazer parte da análise de segurança, buscando soluções para violações potenciais, ou ainda ser empregado no treinamento de despachantes.

1.5 - ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO

Como este trabalho propõe a utilização de *técnicas de sistemas especialistas* para o *controle de tensão*, com inclusão de *chaveamentos como ferramenta de controle*, estes três tópicos serão objetos da abordagem nos capítulos 2 a 4.

No capítulo 2 são apresentadas as formulações para utilização de manobras de inclusão/retirada de linhas de transmissão, para alívio de sobrecargas ou correção no perfil de tensões. Também são analisadas as restrições normalmente apresentadas à utilização de manobras como ferramenta de controle.

No capítulo 3 é abordado o problema do controle de tensão em sistemas de potência. A formulação das sensibilidades entre variáveis dependentes / variáveis de controle, empregada neste trabalho, é incluída também neste capítulo.

No capítulo 4 é feita uma introdução à técnica de sistema especialista e suas aplicações em sistemas de potência e no capítulo 5 são tratados os sistemas especialistas aplicados a controle de tensão e é feita uma descrição das características e principais regras que compõem o sistema em desenvolvimento.

A apresentação dos resultados do programa de simulação de chaveamentos e vários testes do sistema especialista aplicado a dois sistemas teste é feita no capítulo 6, onde também são listadas as conclusões.

O apêndice A descreve as técnicas de diacóptica utilizadas no capítulo 2 para simulação de chaveamentos. O apêndice B apresenta os sistemas de dados utilizados nos testes.

CAPÍTULO 2

UTILIZAÇÃO DE MANOBRAS PARA CONTROLE DA REDE

2.1 - INTRODUÇÃO

O chaveamento (inclusão ou retirada) de uma linha de transmissão (LT) e a alteração da posição do tap de um transformador são exemplos de manobras na rede de transmissão. Estas manobras alteram o estado do sistema e, conseqüentemente, a distribuição dos fluxos, das perdas e correntes de curto em determinados pontos desta rede [10].

A mudança de taps de transformadores ou de bancos de capacitores ou reatores, são manobras usuais do controle de sistemas de potência, mas a prática de retiradas de linhas ou transformadores como opção para solucionar sobrecargas ainda é vista com bastante restrição pelos departamentos de operação de sistemas elétricos, embora seja uma idéia surgida já no início dos anos 80 [3,4]. No entanto, manobras sobre linhas e transformadores são efetuadas ocasionalmente em alguns sistemas reais para corrigir problemas de tensão.

Neste capítulo serão apresentadas técnicas para busca da topologia ótima considerando-se vários objetivos e através de diversas metodologias, procurando-se também avaliar eventuais riscos que uma manobra possa trazer ao sistema. O trabalho será dividido da seguinte forma: no item 2.2 será feita uma revisão bibliográfica dos artigos que tratam da

manobra como opção de controle ou a modelam para análise de contingências; a modelagem e o processo de busca da manobra ótima são apresentados no item 2.3 para controle de sobrecarga e no item 2.4 para controle de tensão; no item 2.5 serão discutidas as restrições normalmente feitas à utilização de manobras como opção de controle e no item 2.6 serão apresentadas as conclusões e recomendações.

2.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos de análise de contingências, vistos no item 1.2, fazem parte da operação em tempo real e procuram verificar os efeitos que seriam sentidos na rede caso houvesse a saída forçada de determinado(s) elemento(s), como por exemplo, perda de uma unidade geradora. No caso de observar-se que determinada contingência causará alguma violação às restrições de operação, é possível definir-se antecipadamente as medidas corretivas que deveriam ser aplicadas se este evento vier a ocorrer.

Por ser um estudo em tempo real, não é possível simular cada contingência utilizando técnicas de fluxo de potência ("load flow"), as quais consumiriam elevado tempo computacional. Foram desenvolvidas então técnicas que simulam a saída de uma linha de transmissão ou transformador de maneira menos precisa, mas que possibilitam a seleção das contingências mais severas, as quais são posteriormente estudadas com mais rigor.

Com a inclusão de chaveamentos de ramos como uma das ferramentas disponíveis para controle de sistemas de potência, os mesmos métodos utilizados para simulação de retiradas de elementos para análise de contingências, passaram a ser utilizados para simular a retirada de um elemento com este novo objetivo [20].

Desde os primeiros trabalhos que temos conhecimento [3],[4] sobre aplicação de chaveamentos no controle corretivo, vêm sendo destacados problemas relativos à natureza discreta deste tipo de controle, o que nos leva geralmente a um algoritmo que utilize programação inteira e mista [5],[15] para busca da topologia ótima.

As operações de chaveamento consideradas usualmente são inclusão/retirada de linhas, transformadores, e abertura/fechamento de disjuntores acopladores de barras. Mudança de taps de transformadores ou de elementos shunt também podem ser incluídas em um modelo de chaveamento [12]. No entanto, Bakirtzis e Meliopoulos [14] sugerem que seja dado um tratamento diferente ao ajuste de taps, podendo os mesmos serem tratados de forma contínua e, após a minimização da função objetivo, sofrerem um ajuste nos seus valores, de acordo com fatores de penalidade que possibilitam a decisão entre aproximar o valor intermediário, obtido no ponto ótimo, para o passo superior ou inferior.

Transformadores e linhas de transmissão podem ter tratamento semelhante para simulação de chaveamentos, necessitando de atenção especial apenas os transformadores defasadores [11].

Geralmente não há muitos elementos em disponibilidade para inclusão no sistema, portanto o trabalho de busca neste sentido não é grande. Quanto à retirada de elementos, podemos chegar a um número intratável de configurações possíveis, uma vez que as mesmas crescem exponencialmente com o número de circuitos chaveáveis. A busca da topologia ótima requer então o uso de técnicas de busca sistemática como a de separação e avaliação progressiva ("branch and bound") [13],[15],[18], ou uma pré-seleção dentre os elementos chaveáveis disponíveis, que leve a uma análise posterior apenas das manobras com possibilidade de amenizar o problema [11],[14],[19].

O chaveamento de disjuntores acopladores de barras altera o número de nós da rede e exige tratamento especial. Mazi e outros [11] sugerem que um disjuntor acoplador de

barras, com chaveamento permitido para controle, seja representado por dois circuitos em série, com impedâncias de valores iguais mas opostos. Desta forma é criada uma barra fictícia que, como alertam os próprios autores, possuirá valor zero na diagonal correspondente da matriz de reatância de barras, o que poderá causar transtornos na fatoração desta matriz. Em [20] o acoplamento entre barras é mostrado como um ramo de baixa impedância.

A busca da manobra ótima deve ser feita de maneira que possibilite sua utilização em tempo real, o que inviabiliza a idéia de testar-se cada alternativa de configuração através de um fluxo de potência completo.

Alguns algoritmos trabalham com fatores de distribuição, os quais relacionam o fluxo na LT chaveada com a variação do fluxo das demais LT's [8],[11] ou tensão nas barras [9]. Estes fatores são calculados a partir de um modelo linearizado, permitindo classificar as manobras que aliviam a sobrecarga ou violação de tensão existente, sem causar outras. A operação escolhida é verificada por um fluxo de potência em corrente alternada.

Bakirtzis e Meliopoulos [14] evitam o teste de todas as manobras possíveis através de uma pré-classificação das prováveis manobras mais eficazes. Isto é feito através de um índice chamado performance da manobra, que mede a distância do ponto de operação simulado ao estado normal, utilizando o modelo de um fluxo de potência desacoplado rápido. As melhores manobras são verificadas por um fluxo de potência completo.

O teorema da compensação é bastante empregado para simular mudanças na matriz de admitância nodal. Este teorema afirma que a alteração da admitância de um ramo da rede tem efeito semelhante à ligação de uma fonte de corrente, de intensidade apropriada, aos nós terminais do ramo alterado [1]. Isto permite a utilização dos fatores triangulares da matriz admitância nodal original para simular alterações na rede, bastando para tanto que se obtenha os valores apropriados das injeções. Em [7] os autores fazem um apanhado dos vários métodos de compensação para modificação da rede, analisando e sugerindo quando um determinado

método ou outro deve ser selecionado, ou ainda quando a refatorização da matriz admitância é mais aconselhável.

De maneira similar, vários métodos utilizam o artifício de simular a inclusão ou retirada de um elemento através da modificação da injeção de corrente (ou potência) nas barras terminais deste elemento [2],[8], evitando assim alterar a matriz Jacobiana do caso base e rodando um fluxo de potência completo apenas para verificação da solução obtida. Em uma variante são alterados inicialmente os fluxos das demais linhas conectadas às barras terminais do elemento retirado, considerando que as demandas programadas devem ser atendidas pelas ligações remanescentes [6]. Skokljev [20] modificou este método para incluir, além das manobras de retiradas de ramos, chaveamentos para inclusão de elementos, tratamento para acopladores de barras e permuta entre ramos. Nestes trabalhos [2],[6],[20], os autores utilizam técnicas CA e matrizes de sensibilidade e não visam o objetivo de controle mas de simulação de contingências.

Cavati e Prada [18] trabalham com a função objetivo mínimo desvio quadrático das tensões nos barramentos, ao mesmo tempo em que buscam que os limites operacionais sejam respeitados e a carga atendida. Inicialmente é resolvida uma versão do problema relaxado, com todas as LT's em operação. Em seguida são resolvidos sub-problemas para cada opção de chaveamento. Também é utilizado o artifício de simular a retirada de uma linha pelo método da compensação, com modelagem CA, sem alterar efetivamente a topologia inicial.

Gorenstin e outros [15] integram as decisões de chaveamento à otimização com redespacho de geração, corte de carga e outras ações de controle. Inicialmente o problema completamente relaxado é resolvido, e a partir deste resultado inicial é aplicado um algoritmo do tipo "branch and bound". A função custo inclui minimização do custo de geração e custo do corte de carga. São desenvolvidas duas formulações. A primeira trabalha com variáveis binárias $\{0,1\}$ representando chaveamentos e na segunda (a qual apresenta melhores resultados) as

variáveis de decisão de chaveamento são representadas por injeção de compensação. A rede é modelada por um fluxo de potência linearizado.

Em outras referências [5],[12],[13] também são aplicados modelos linearizados associados a busca da topologia ótima através do método de "branch and bound". As funções objetivo variam entre minimização do custo de geração e alívio de sobrecargas em uma ou mais LT's ou transformadores.

Paillet e Dubost apresentam em [34] um sistema baseado no conhecimento que utiliza heurísticas no processo de busca de uma manobra para remoção ou alívio de sobrecargas. Este sistema inclui idéias como a de analisar a direção dos fluxos na vizinhança de uma linha sobrecarregada para selecionar partes da rede interessantes ao processo, diminuindo o espaço de busca. O objetivo é encontrar uma reconfiguração que reduza a sobrecarga na rede, não uma topologia "ótima".

Em [16] é aplicado um algoritmo tendo como função objetivo o alívio de sobrecargas, com busca da manobra ótima através de técnicas de "branch and bound" e simulação da eliminação/inclusão de ramos por alteração na injeção das barras terminais. O modelo da rede é o linearizado, sendo executado um fluxo de potência CA apenas para a manobra, ou conjunto de manobras, ótima. É esta a idéia básica a ser seguida no presente trabalho, considerando-se a aplicação de manobras na correção de sobretensões.

2.3 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE SELEÇÃO DE MANOBRAS SOBRE A TOPOLOGIA DA REDE PARA ALÍVIO DE SOBRECARGAS.

Dentre as várias alternativas citadas no item 2.2 para modelagem do chaveamento e busca da manobra ótima, será aqui apresentada a indicada por Ungaretti [16]. A busca da manobra (adição ou retirada simples) ou subconjunto de manobras é feita procurando-se minimizar uma função objetivo, no caso igual à soma total das sobrecargas na rede.

$$ZY = \sum_{i=1}^{NLSC} |\bar{T}_i - |T_i|| \quad (2.1)$$

Onde:

NLSC = número de elementos sobrecarregados,

\bar{T}_i = trânsito máximo nos elementos,

T_i = trânsito no elemento i .

A solução do problema é decomposta em dois níveis. O primeiro procura encontrar a manobra m_i (adição ou retirada simples), ou o subconjunto de manobras $\{m\}$ (alterações múltiplas de adição), que mais contribui para o alívio ou eliminação das sobrecargas do caso em estudo. No segundo nível, caso ainda persistam sobrecargas após as manobras, é aplicado um redespacho de geração e, em última instância, é feito alívio de carga.

A simulação da adição/retirada de circuitos é baseada no Teorema da Compensação. A rede é representada através de um fluxo de carga em corrente contínua, descrito por:

$$\underline{P} = B \cdot \underline{\theta} \quad (2.2)$$

Sendo:

\underline{P} = vetor das injeções líquidas de potência ativa,

$\underline{\theta}$ = vetor dos ângulos das tensões nodais,

B = matriz tipo admitância nodal.

No caso da remoção de um circuito i-m evita-se a alteração da matriz B através das injeções de compensação I_c , exemplificadas na Figura 2.1:

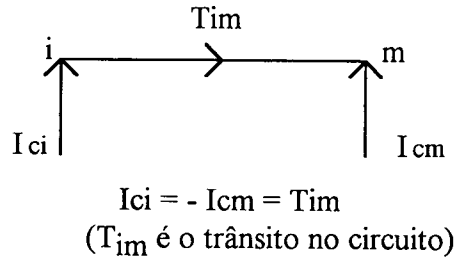


Figura 2.1 - Injeções de compensação

Trabalhando-se as equações da rede pode-se obter a relação entre os trânsitos de potência ativa nos ramos e as injeções nas barras:

$$\underline{T} = \underline{S} \cdot \underline{P} \quad (2.3)$$

Sendo:

\underline{S} = matriz que relaciona as injeções de potência ativa nos nós com os trânsitos de potência ativa nos ramos (dimensão $NL \times (NB-1)$).

\underline{T} = vetor dos trânsitos de potência ativa na rede

NL = número de ramos da rede e

NB = número de barras da rede.

\underline{S} pode ser descrita como:

$$\underline{S} = \underline{\gamma} \cdot \underline{A} \cdot \underline{B}^{-1} \quad (2.4)$$

Onde:

$\underline{\gamma}$ = matriz diagonal cujos elementos são as susceptâncias primitivas dos ramos ($NL \times NL$) e

\underline{A} = matriz de incidência dos ramos nos nós da rede, excluindo o nó de referência ($NL \times (NB-1)$)

Por sua vez, a variação da injeção líquida numa barra pode ser expressa por:

$$\underline{\Delta P} = (\underline{P}_G - \underline{P}_C) + \underline{H} \cdot \underline{I}_c \quad (2.5)$$

Onde:

\underline{P}_G = vetor das injeções de geração de potência ativa,

\underline{P}_C = vetor das injeções de carga de potência ativa,

\underline{I}_c = vetor das injeções de compensação de potência ativa,

H = matriz de incidência barra-injeção de compensação.

Cada linha de H é composta de zeros, exceto nas posições correspondentes às barras terminais do circuito associado à injeção de compensação, que valem respectivamente 1 e -1.

Aplicando-se (2.5) em (2.3) encontra-se a relação:

$$\underline{T} = S[\underline{P}_G - \underline{P}_C + H.\underline{I}_c] \quad (2.6)$$

ou

$$\underline{T} = S[\underline{P}_G - \underline{P}_C] + S.H.\underline{I}_c \quad (2.7)$$

definindo-se:

$$\underline{T}^0 = S^0(\underline{P}_G^0 - \underline{P}_C^0) \quad (2.8)$$

e

$$\underline{\Delta T} = R.\underline{I}_c \quad (2.9)$$

onde

$$R = S.H \quad (2.10)$$

e de posse do vetor $\underline{\Delta T}$, que dá a variação do trânsito nos elemento i após a adição ou remoção de um elemento de conjunto $\{L\}$ (elementos chaveáveis), pode-se verificar o efeito de cada chaveamento ou conjunto de chaveamentos na função objetivo, transformada em:

$$ZY = \sum_{i=1}^{NLSC} |\bar{T}_i - |T_i^0 + \Delta T_i|| \quad (2.11)$$

A solução do sub-problema do primeiro nível é a manobra ou conjunto de manobras, dentre as possíveis, que mais contribui para o alívio de sobrecargas.

2.4 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE SELEÇÃO DE MANOBRAS SOBRE A TOPOLOGIA DA REDE PARA A CORREÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO

Para análise do efeito de um chaveamento no perfil de tensões é necessário que se busque uma modelagem CA, evitando-se porém, a execução de um fluxo de potência completo.

Sachdev e Ibrahim [2] apresentam um método para simulação de retiradas de elementos similar ao método das injeções de compensação, apresentado no item 2.3.

Inicialmente o sistema de N barras é descrito por 2.N equações não lineares:

$$PI_i = PG_i - PD_i = \sum_{j \in A_i} P_{ij} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (2.12.a)$$

$$QI_i = QG_i - QD_i = \sum_{j \in A_i} Q_{ij} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (2.12.b)$$

onde:

$PI_i + jQI_i$ - injeção de potência complexa na barra i;

$PG_i + jQG_i$ - geração de potência complexa na barra i;

$PD_i + jQD_i$ - carga complexa na barra i;

$P_{ij} + jQ_{ij}$ - fluxo de potência complexa da barra i para a j;

A_i - conjunto de barras do sistema, conectadas a i.

O fluxo em uma linha que liga as barras i e j é dado por:

$$P_{ij} = V_i^2 Y_{ij} \sin \alpha_{ij} + V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.13.a)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 (Y_{ij} \cos \alpha_{ij} - 1/2 B_{ij}) - V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.13.b)$$

sendo:

V_i, V_j - módulo das tensões nas barras i e j;

δ_i, δ_j - ângulo das tensões nas barras i e j;

Y_{ij} - módulo da admitância da linha ij;

α_{ij} - 90° - ângulo da impedância da linha ij e

B_{ij} - susceptância da linha ij.

A partir das equações 2.12 e 2.13 e utilizando-se o método de Newton Raphson, são formuladas as seguintes equações do sistema [82]:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P^v} \\ \underline{\Delta Q^v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta V^v} \\ \underline{\Delta \theta^v} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Matriz Jacobiana

sendo:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}}; & N &= \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}} \\ M &= \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}}; & L &= \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \underline{\Delta P} &= \underline{P}_{esp} - \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}) \\ \underline{\Delta Q} &= \underline{Q}_{esp} - \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

A matriz Jacobiana é calculada inicialmente considerando o estado estimado do sistema; os erros nas injeções nas barras são calculados utilizando as restrições operativas e o estado inicial. O vetor de correções é então calculado e o estado é re-estimado até a convergência da solução.

O que Sachdev e Ibrahim sugerem em [2] é que a inversa da matriz Jacobiana seja utilizada como uma matriz de sensibilidade e que a mudança nas injeções nas barras terminais do elemento desligado sejam iguais ao fluxo neste elemento no estado final.

$$\Delta P_{I_i} = P_{ij}; \quad \Delta P_{I_j} = P_{ji}; \quad \Delta Q_{I_i} = Q_{ij}; \quad \Delta Q_{I_j} = Q_{ji} \quad (2.17)$$

$$\begin{array}{|c|} \hline S \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta P_{Ii} \\ \Delta P_{Ij} \\ \Delta Q_{Ii} \\ \Delta Q_{Ij} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \hline \end{array} \quad (2.18)$$

Não é necessário que se calcule toda a matriz S . Uma vez que o vetor de correção de potência ativa e reativa terá no máximo 4 posições não nulas, quando as barra i e j são PQ, basta que se obtenha as colunas da matriz S correspondentes a estas posições.

O método é iterativo. Nas primeiras iterações são calculados apenas ΔV_i , ΔV_j , $\Delta \theta_i$, $\Delta \theta_j$ e as tensões nas barras i e j são atualizadas. Somente após a convergência, ou seja, quando as correções nas injeções de potência não variam mais, são calculadas as tensões nas demais barras.

No presente trabalho será analisado um método similar ao apresentado até aqui.

O número de P_{Ii} 's e Q_{Ii} 's depende do tipo das barras conectadas à LT cuja retirada está sendo simulada, de acordo com a tabela a seguir [2]:

Barra i	Barra j	Injeções Calculadas
PV	Referência	ΔP_{Ii}
PQ	Referência	$\Delta P_{Ii}; \Delta Q_{Ii}$
PV	PV	$\Delta P_{Ii}; \Delta P_{Ij}$
PQ	PV	$\Delta P_{Ii}; \Delta Q_{Ii}; \Delta P_{Ij}$
PQ	PQ	$\Delta P_{Ii}; \Delta Q_{Ii}; \Delta P_{Ij}; \Delta Q_{Ij}$

Ao invés de utilizar fatores de aceleração [2], este método procurará compensar o fato da matriz Jacobiana não ser alterada, quando da ocorrência de uma mudança na topologia da rede, com a utilização de técnicas de diacóptica (Ver Apêndice A).

A formulação apresentada no apêndice A é adaptada para este caso específico. A matriz A^{-1} (Jacobiana neste problema) já é disponível na forma fatorada e B (matriz de perturbação) apresenta elementos não nulos apenas nas posições referentes às linhas e colunas da matriz Jacobiana correspondentes às barras terminais da linha cuja retirada está sendo simulada, ou seja, no máximo os 16 elementos destacados na figura 2.2, no caso de ambas as barras terminais serem PQ.

barra i				barra j			
m		m+1		n		n+1	
....	ΔH_{ii}	ΔN_{ii}	.....	ΔH_{ij}	ΔN_{ij}	.....
....	ΔM_{ii}	ΔL_{ii}	.....	ΔM_{ij}	ΔL_{ij}	.....
.
.
....	ΔH_{ji}	ΔN_{ji}	.....	ΔH_{jj}	ΔN_{jj}	.....
....	ΔM_{ji}	ΔL_{ji}	.....	ΔM_{jj}	ΔL_{jj}	.....
.

Figura 2.2 - Estrutura da Matriz de Perturbação

Os elementos da matriz de perturbação B não mostrados na figura 2.2 são nulos. Os elementos com índice $i-j$ e $j-i$ anulam os elementos correspondentes na matriz Jacobiana, e os elementos com índice $i-i$ e $j-j$ subtraem dos elementos correspondentes na matriz Jacobiana a parte referente à ligação $i-j$, de forma que:

$$J^{\text{modificada}} = J^{\text{anterior}} + B \quad (2.19).$$

O procedimento para esta compensação é bastante simples(ver Apêndice A):

- 1) Formar o vetor de desvios de potência, aqui denominado $\underline{\Delta y}$;
- 2) Resolver $J \cdot \underline{x} = \underline{\Delta y}$;
- 3) Formar as colunas não nulas da matriz de perturbação, B^r ;
- 4) Resolver $X = J^{-1} \cdot B^r$, onde B^r possuirá no máximo 4 colunas com elementos não nulos e X pode ser obtido aplicando J^{-1} (já fatorada) a cada coluna de B^r ;
- 5) Separar X nas submatrizes X_r e X_{n-r} , onde X_r é formada pelas linhas de X correspondentes às variáveis em \underline{z}_r e X_{n-r} é formada pelas demais linhas de X .
- 6) Obter $\underline{z}_r = (1 + X_r)^{-1} \cdot \underline{x}_r$. Observar que a matriz $(1 + X_r)$, a ser invertida, terá no máximo dimensão 4×4 ;
- 7) Obter $\underline{z}_{n-r} = \underline{x}_{n-r} - X_{n-r} \cdot \underline{z}_r$;
- 8) Formar \underline{z} , ou seja, $\underline{\Delta V / \Delta \theta}$, a partir de \underline{z}_r e \underline{z}_{n-r} .
- 9) Atualizar as tensões.

Podem ser simulados chaveamentos de linhas, transformadores ou elementos shunt, estando a diferença apenas no cálculo da matriz B , que representa a contribuição do elemento em questão à matriz jacobiana. Observa-se ainda que o procedimento pode ser interrompido no passo 6, quando se desejar conhecer apenas a modificação da tensão nas barras terminais do elemento desconectado.

Os resultados obtidos da aplicação deste algoritmo podem ser observados no capítulo 6.

2.5 - RESTRIÇÕES À UTILIZAÇÃO DE CHAVEAMENTOS DE LT's E TF's

2.5.1 - Efeitos de Transitórios de Manobras

As sobretensões em sistemas elétricos são geralmente causadas por: surtos de manobra, descargas atmosféricas (estas primeiras interessam ao planejamento), rejeição total ou

parcial de carga, efeito Ferranti, auto-excitação, curto circuitos monofásicos e ferorrressonância (sobretensões dinâmicas, interessam à operação).

O ajuste do sistema de proteção e a coordenação de isolamento dos sistemas para tensões iguais ou superiores a 345 kV são definidos pelas sobretensões de manobra [17]. Os surtos dependem das condições iniciais, como ponto onde ocorre a manobra nas ondas de tensão e corrente, comprimento da LT, configuração do sistema, etc.

As manobras de maior interesse são:

- energização de linha terminada por transformador sem carga ou com o disjuntor da outra extremidade aberto;
- re-energização de linha com carga residual;
- rejeição de carga pela abertura do disjuntor da outra extremidade da linha,
- manobras em transformadores sem carga, ou com reatores shunt ligados no terciário e em
- reatores de AT.

As LT's e seus equipamentos terminais são dimensionados para suportar as manobras de energização e desenergização dentro de uma ampla faixa de condições operativas do sistema. A abertura de uma LT com alto carregamento ou com algum tipo de curto circuito produz surtos bem piores que a abertura com carga baixa, como é feito para controle de tensão.

O equipamento terminal mais solicitado numa abertura de linha sob condições normais (com ou sem curto) é o disjuntor. Para cada classe de tensão padronizada existe um valor normalizado de tensão transitória suportável e de corrente capacitiva interrompida, sendo que estes valores são definidos com uma boa margem de segurança para abertura normal sem curto. A Tabela 2.2 apresenta valores definidos na NBR 7118 para a capacidade de interrupção nominal dos cabos, ou seja, a corrente máxima que cabos em vazio podem interromper sem exceder os valores admissíveis das sobretensões de manobra.

Tabela 2.2 - Capacidade de Interrupção Nominal de Linhas em Vazio

Tensão Nominal (kV eficaz)	Capacidade de interrupção nominal de linhas em vazio. (A eficaz)
72,5	10
92	20
145	50
242	125
362	315
460	400
550	500

A tensão transitória através dos contatos do disjuntor ao abrir vai depender também da LT ter ou não compensação shunt. Como os disjuntores de alta tensão são rápidos e, por especificação, livres dos problemas de reignição do arco, o uso de chaveamentos para controle não deve causar danos aos equipamentos.

A experiência da ELETROSUL confirma estes pontos. Não há registro de problema por abertura mais freqüente de qualquer LT de 230 ou 525 kV.

2.5.2 - Diminuição da Vida Útil dos Disjuntores

Embora haja relação entre o número de manobras sofridas por um disjuntor e a necessidade de manutenção do mesmo, verifica-se em catálogos e manuais destes equipamentos que há também uma relação com o tempo de operação e a intensidade da corrente interrompida.

Na maioria dos catálogos consultados o número de interrupções permitidas entre inspeções com corrente de interrupção nominal não é superior a 10, mas o número de interrupções permitidas com corrente de carga nominal costuma ultrapassar a 1000.

Como pretende-se utilizar o recurso de chaveamento neste trabalho como uma opção final em períodos de carga leve, o desgaste nos disjuntores não deverá ser fator restritivo.

Apenas, ressalta-se que a manutenção periódica dos disjuntores pode ter que ser mais freqüente ou ainda ocorrerem danos em alguma parte mecânica do disjuntor construída com material de menor qualidade ou com imperfeições.

2.5.3 - Diminuição da Confiabilidade do Sistema Elétrico

O termo confiabilidade tem várias definições. Do ponto de vista do consumidor significa normalmente qualidade e continuidade de serviço. Já do ponto de vista do fornecedor, a confiabilidade está ligada à preocupação com a reserva de energia atual e futura e restrições operacionais que não são sentidas diretamente pelos consumidores [105].

A avaliação da confiabilidade de um sistema é feita muitas vezes através do custo das interrupções de fornecimento [105] ou através de índices tais como [106]: probabilidade de falha, freqüência das falhas, número esperado de cortes de carga, corte de carga esperado, energia não suprida esperada, duração esperada dos cortes de cargas, número esperado de violações de tensão, etc.

Em [106] é feita distinção entre adequabilidade e segurança, dois termos associados à confiabilidade. A adequabilidade se refere a capacidade do sistema atender a carga, ou seja, ter geração suficiente e uma rede de transmissão/distribuição que atenda aos pontos de consumo sob condições estáticas. Já a segurança se relaciona a habilidade do sistema responder a distúrbios tais como perda de elementos de geração ou transmissão.

No caso deste trabalho, o objetivo é avaliar a diminuição da confiabilidade do sistema após o desligamento de determinada linha para controle de tensão.

Esta avaliação poderia ser feita através de alguns dos índices acima citados. A obtenção destes índices é associada a uma análise de contingências e um índice total poderia acumular o produto da probabilidade de cada contingência vir a ocorrer x perda de carga

causada pela mesma. Uma vez disponíveis os índices acumulados para o sistema completo e para o sistema com a LT chaveada, é possível uma análise da perda de confiabilidade.

Para sistemas de grande porte estes cálculos se tornam bastante complexos e alguns pacotes computacionais, como o NH2 [107], fornecem índices como energia esperada não suprida (EPNS) e probabilidade de perda de carga (LOLP) para determinados pontos de carga fazendo uma análise de cenários. Para cada cenário o programa tenta corrigir eventuais violações e caso o corte de carga seja necessário os índices LOLP e EPNS são atualizados.

No caso do uso de chaveamentos como ferramenta para controle deve ser feita uma análise de riscos antes que se liste uma determinada linha como passível de desligamento para controle de tensão. Uma outra forma de avaliação seria simplesmente executar uma análise de contingências para o sistema completo e sem a LT em questão, comparando os resultados. Como os chaveamentos para controle de tensão são empregados apenas em períodos de carga leve e mínima o sistema, mesmo com sua rede de transmissão reduzida, tem normalmente condições de suportar as contingências mais comuns.

2.6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método aqui apresentado procura dar um tratamento simplificado mas confiável à simulação de chaveamentos de linhas de transmissão. Embora possa ser utilizado na análise de contingências, o objetivo neste caso é verificar o efeito do desligamento de uma linha de transmissão ou transformador ou ainda reatores/capacitores shunt no perfil de tensões.

De maneira similar ao que é feito nas empresas de energia elétrica, serão feitos estudos para cada período de carga a fim de verificar em que casos específicos uma determinada manobra deverá ser efetuada como uma opção de controle.

Estes casos pré-determinados foram incluídos na lista de regras do sistema especialista para controle de tensão (capítulo 5 deste trabalho), o qual, ao verificar condições similares às definidas na regra, sugere a aplicação da manobra. O efeito desta manobra é inicialmente verificado em tempo real da maneira simplificada descrita no item 2.4, e se aprovada, através de um fluxo de potência completo.

As principais vantagens do método são sua rapidez e precisão. A rapidez vem do fato de serem utilizados fatores da matriz jacobiana disponíveis ao final do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson, executado no início do processo. A precisão ao final da primeira iteração dispensa o processamento de novas iterações, reforçando a rapidez do método.

No caso de aplicações práticas de retiradas de linhas para controlar sobretensões em períodos de carga leve ou mínima devem ser desenvolvidos procedimentos a serem seguidos no momento de retornar a LT. Isto porque no momento da energização novas sobretensões podem ser criadas, sendo estas funções de vários fatores, inclusive de qual terminal é ligado em primeiro lugar. Na referência [60] é apresentado um sistema especialista para lidar com este problema.

Vários testes feitos com sistemas de vários portes são mostrados no capítulo 6, sendo feita inclusive uma análise de consumo de tempo computacional. Trabalhos futuros devem ser desenvolvidos a partir deste, aplicando o procedimento ao fluxo de potência desacoplado e/ou para tratar da inclusão de elementos na rede.

CAPÍTULO 3

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA

3.1 - INTRODUÇÃO

O controle de potência ativa tem seus benefícios diretamente ligados à economia, além da possibilidade de se determinar uma melhor distribuição da reserva girante.

Já o controle de potência reativa está associado diretamente à qualidade do serviço e segurança do sistema elétrico. Sobretensões podem levar a danos no isolamento de equipamentos, enquanto subtensões causam diminuição na capacidade de transmissão das linhas, aumento das perdas de transmissão e diminuição da estabilidade do sistema.

As principais justificativas geralmente apresentadas para o despacho de potência reativa são [81]:

- economia de combustível através da redução das perdas ativas do sistema;
- diminuição do carregamento do sistema e dos equipamentos através da redução dos fluxos de reativos e das perdas ativas e reativas;
- redução dos gradientes de tensão no sistema.

Outro aspecto a se observar é o efeito da tensão no valor do carregamento da rede. Embora normalmente a carga do sistema seja modelada como potência constante para

análise em regime permanente, isso não corresponde à realidade. A carga do sistema é formada por um conjunto de vários tipos de cargas com características diferentes, como iluminação, aquecimento, motores, etc, que são sensíveis à variação de tensão e temperatura. Na região entre 80% e 120% da tensão nominal a carga pode ser expressa em função da tensão através das seguintes relações [86]:

$$P = (V/V_n)^a \cdot P_n \quad (3.1)$$

$$Q = (V/V_n)^b \cdot Q_n \quad (3.2)$$

onde o índice n corresponde aos valores nominais. Os valores de a e b vão respectivamente de 0.6 a 1.4 e de 1.5 a 3.2.[86].

Em [87] Chen e Chan fazem uma análise do efeito da tensão sobre o consumo nos sistemas de distribuição e concluem que o consumo e as perdas podem ser reduzidos através da redução da tensão.

Não existe uma modelagem linearizada que trate isoladamente o problema tensão/reativos, como há para análise de potência ativa. Portanto, para calcular mudanças no módulo das tensões no caso de uma contingência, por exemplo, é necessário que sejam avaliadas também as alterações nos ângulos das tensões.

A aproximação mais direta é a que primeiro calcula as variações nos ângulos das tensões através de uma análise de ativos, e em seguida os ângulos atualizados são empregados na análise de reativos [90].

Há dois grupos básicos de problemas de tensão: no primeiro, que ocorre mais frequentemente, há um perfil de tensões pós-contingência estável mas fora dos limites operativos e o tempo para correção não é crítico; já no segundo grupo há um sinal de instabilidade de tensão, acompanhado por instabilidade de frequência e a correção precisa ser rápida e cuidadosa, pois alguns controles normalmente utilizados podem deteriorar ainda mais a

situação [99]. Nestes casos o sistema pode chegar a um ponto onde um pequeno aumento na demanda do lado receptor pode levar a tensão a cair a níveis inaceitáveis, ou seja, ocorre o chamado colapso de tensão.

O colapso de tensão é um fenômeno causado pela operação próxima ao limite de transmissão e pode ocorrer em níveis de transmissão até inferiores aos limites térmicos das linhas, quando a demanda é alta e há grande transferência de reativos. Este aspecto de prevenção da instabilidade tem recebido considerável atenção na literatura. Em [95] os autores propõem o uso de um índice que indica a proximidade de colapso de tensão, baseado na solução de impedância ótima em um sistema de duas barras. A tensão e a potência críticas podem ser estimadas, dando uma idéia do quanto a carga pode ser acrescida antes do colapso. Em [96] os mesmos autores usam este índice incorporado a um despacho ótimo de reativos, a fim de minimizar a possibilidade de colapso de tensão no sistema.

O problema do colapso de tensão também pode ser tratado por sistemas especialistas. Sutanto, Lachs e Zhu [65] usam a técnica de reconhecimento de padrões para detectar possíveis casos de colapso de tensão em estágios iniciais e então aplicar medidas para conter sua evolução. Este sistema dispensa o uso de simulações da rede e age dentro do primeiro minuto, evitando o agravamento da situação.

Como a prevenção ao colapso de tensão não faz parte deste trabalho, apenas técnicas para violações do grupo 1 serão citadas no item 3.3. No item 3.4 será apresentada a formulação das sensibilidades empregadas neste trabalho, utilizando as variáveis de controle apresentadas no item 3.2 e no item 3.5 são apresentadas as conclusões.

3.2 - VARIÁVEIS DE CONTROLE

Os controles mais comuns em sistemas de potência são [61]:

1) Variáveis que influem principalmente no subproblema Potência Ativa

- potência ativa gerada,
- taps de transformadores defasadores,
- intercâmbios de potência ativa e
- transferência de potência em elos DC.

2) Variáveis que influem principalmente no subproblema Potência Reativa

- tensão de geração ou potência reativa gerada,
- taps de transformadores em fase,
- capacitores e reatores shunt.

3) Variáveis que afetam os subproblemas Potência Ativa e Reativa

- transformadores com relações complexas,
- entrada/saída de unidade geradora,
- corte de carga,
- chaveamento de linhas.

Em condições de emergência é importante que o estado do sistema seja corrigido com o mínimo de ajuste nas variáveis de controle [87], sendo respeitados os limites de excursão nestes controles.

3.3 - EXAME DAS ALTERNATIVAS EXISTENTES NA LITERATURA PARA TRATAR DO PROBLEMA

Dentro da operação em tempo real, o fluxo de potência ótimo (FPO) tem a tarefa de otimizar o estado de operação do sistema de potência. No FPO uma função objetivo é otimizada, respeitando as restrições operativas, e tendo como solução a programação dos módulos de tensão nas unidades geradoras, da geração de reativos em capacitores e reatores shunt, além das posições dos taps de transformadores. Em um caso particular o FPO busca minimizar custo, podendo então também ser chamado de "Despacho Econômico", sempre sujeito a restrições de igualdade impostas pelo fluxo de potência e de desigualdade impostas pelos limites dos equipamentos. O fluxo de potência ótimo pode ser utilizado para levar o sistema de um estado operativo a outro (Figura 1.1, página 4), devendo idealmente atender às seguintes características [90]:

- ser utilizável em tempo real ou modo estudo,
- programar controle ativos, reativos ou ambos,
- alcançar um determinado nível de segurança,
- minimizar um determinado objetivo operacional.

Ainda não há disponível um método que atenda bem a todos os problemas de fluxo de potência ótimo em tempo real. Como a solução corretiva precisa ser encontrada com urgência, muitos métodos sacrificam precisão em troca de velocidade, considerando, por exemplo, lineares as variáveis discretas como tap de transformadores e dispositivos shunt.

O FPO é geralmente formulado matematicamente da forma:

Minimizar:

$$f(\underline{u}, \underline{x}) \tag{3.1}$$

Sujeito a:

$$g(\underline{u}, \underline{x}) = \underline{0} \quad (3.2)$$

e

$$h(\underline{u}, \underline{x}) \geq \underline{0} \quad (3.3)$$

onde:

\underline{u} - conjunto de variáveis de controle

\underline{x} - conjunto de variáveis dependentes

As equações (3.2) são as equações da rede e as (3.3) os limites operacionais sobre os controles \underline{u} , já citados no item 3.2.

Em muitos casos é indesejável que se alterem muitos controles simultaneamente, assim como não é apropriado tentar reprogramar controle de potência ativa juntamente com os de potência reativa [90].

As funções objetivo mais comuns são [90]:

1) Mínimo custo operacional. Este objetivo compreende a soma dos custos de geração mais a soma dos custos dos intercâmbios. Variáveis sem custo direto, como taps e tensão de geração são incluídas apenas na minimização das perdas de transmissão.

2) Mínima perda de potência ativa na transmissão. A minimização das perdas é geralmente associada com a programação tensão/var.

3) Mínimo desvio de um ponto específico de operação. Este objetivo geralmente é definido como a soma dos quadrados dos desvios nas variáveis de controle.

4) Mínimo número de controles reprogramados. Neste caso se procura reduzir o número de controles alterados.

A seleção de uma função ou outra depende da aplicação. Por exemplo, na programação da operação a minimização das perdas ativas fornece ao operador um estado favorável do sistema; já no despacho corretivo se busca um esforço de controle pequeno e a função objetivo mais apropriada seria a soma ponderada dos desvios das variáveis de controle e

na ação corretiva a função objetivo mais adequada seria a minimização da soma ponderada das violações nos limites [92].

A utilização do fluxo de potência ótimo em tempo real apresenta várias restrições, entre elas [90] a falta de interação com o operador e a falta da definição da sequência de atuação em controles.

Os maiores desafios na área de FPO estão no subproblema de controle de reativos, cujo objetivo principal é assegurar um bom controle de tensão, sendo a redução das perdas um sub-produto [90].

Contaxis, Papadias e Dekis [83] sugerem uma otimização desacoplada, onde a cada iteração o FPO é decomposto em dois subproblemas, que por sua vez são transformados em problemas de programação quadrática. A função objetivo do subproblema ativo é a minimização de custos e do subproblema reativo é a minimização da geração ativa na barra de referência, através do controle sobre as tensões de geração.

Em [89] Baidas, Somuah e Opoku também dão um tratamento desacoplado ao problema, que é linearizado através do cálculo de sensibilidades e resolvido pelo método linear dual simplex. A função objetivo, tanto para o controle ativo quanto para o controle reativo é a minimização da soma ponderada dos ajustes nas variáveis de controle para a correção de violações no carregamento de linhas e/ou limites de tensão nas barras de carga.

A correção de sobrecargas em LT's ou violações de tensão com minimização dos desvios nas variáveis de controle também é formulada em [98]. Nesta modelagem, no entanto, a função objetivo é quadrática (soma do quadrado dos desvios nas variáveis de controle) e as restrições linearizadas.

Outros métodos [80],[82],[84],[88] tratam isoladamente do problema de controle tensão/potência reativa. Alguns destes métodos [80],[82],[88] utilizam programação linear e função objetivo variando entre:

- mínima variação na potência reativa gerada,
- minimização das perdas ativas,
- minimização dos desvios de tensão,
- maximização das margens de potência reativa,
- mínimo ajuste nas variáveis de controle.

Em outro trabalho [84] é utilizada programação quadrática com opções de função objetivo ligadas à segurança (maximização das margens de potência reativa) ou à economia (minimização das perdas de potência ativa).

3.4 - CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES

A maioria dos algoritmos existentes para controle de tensão e reativos faz uso de fatores de sensibilidades entre variáveis consideradas dependentes e as de controle do sistema. Estas matrizes são geralmente de dimensões altas e não esparsas e da precisão na obtenção dos seus valores dependerá a exatidão do método. A necessidade de precisão contudo não elimina a restrição ao consumo de tempo computacional e memória para armazenamento e a solução para tantos requisitos costuma ser a linearização.

O princípio mostrado por Kirschen e Van Meeteren [91] para controlar violações de tensão através de injeções de potência ativa parte da relação:

$$\underline{\Delta V} = K \cdot \underline{\Delta P} \quad (3.4)$$

Onde a matriz de sensibilidade K pode ser derivada da equação Jacobiana particionada:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta} \\ \underline{\Delta V} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Considerando-se as injeções de potência reativa constantes:

$$\underline{\Delta V} = [-L^{-1} \cdot M(H - N \cdot L^{-1} \cdot M)^{-1}] \cdot \underline{\Delta P} \quad (3.6)$$

Após rejeição do termo $N L^{-1}$ e substituição das matrizes H e L por B' e B'' do fluxo de potência desacoplado rápido a equação anterior torna-se:

$$\underline{\Delta V} = [(B'')^{-1} \cdot (-M)(B')^{-1}] \underline{\Delta P} \quad (3.7)$$

Ortega em [93] faz a linearização inicialmente nas equações do fluxo de potência $g_{LF}(u, x) = 0$. Esta linearização é feita expandindo-se as equações em série de Taylor em torno da solução inicial (u^0, x^0) , obtendo:

$$g_{LF}(\underline{u}^0 + \underline{\Delta u}, \underline{x}^0 + \underline{\Delta x}) \approx g_{LF}(\underline{u}^0, \underline{x}^0) + \left. \frac{\partial g^T(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{u}^0, \underline{x}^0} \cdot \underline{\Delta x} + \left. \frac{\partial g^T(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{u}^0, \underline{x}^0} \cdot \underline{\Delta u} \quad (3.8)$$

Já que $(\underline{u}^0, \underline{x}^0)$ e $(\underline{u}^0 + \underline{\Delta u}, \underline{x}^0 + \underline{\Delta x})$ satisfazem as equações do fluxo de potência:

$$\left. \frac{\partial g^T(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{u}^0, \underline{x}^0} \cdot \underline{\Delta x} + \left. \frac{\partial g^T(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{u}^0, \underline{x}^0} \cdot \underline{\Delta u} = 0$$

e portanto:

$$\underline{\Delta x} = - \underbrace{\left[\frac{\partial g^T(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{x}} \right]^{-1}}_{J_{LF}} \underbrace{\left[\frac{\partial g^T(\underline{u}, \underline{x})}{\partial \underline{u}} \right]}_{S_A} \cdot \underline{\Delta u} \quad (3.9)$$

onde:

$$\underline{\Delta x} = | \underline{\Delta \theta}_{PV} \quad \underline{\Delta \theta}_{PQ} \quad \underline{\Delta V}_{PQ} |^T$$

$$\underline{\Delta u} = | \underline{\Delta V}_g \quad \underline{\Delta a} |^T$$

$\Delta \underline{x}$ pode ser identificado como o vetor de incrementos nas variáveis dependentes, onde $\Delta \theta_{PV}$ e $\Delta \theta_{PQ}$ são os incrementos nos ângulos das tensões das barras PV e PQ, respectivamente, e ΔV_{PQ} são os incrementos correspondentes às magnitudes de tensão das barras de carga.

J_{LF} é a matriz jacobiana do fluxo de potência de ordem $[NJ \times NJ]$, que relaciona as injeções de potência das barras PV e PQ com as variáveis dependentes $\Delta \underline{x}$, e NJ é igual ao número de barras PV mais o dobro do número de barras PQ.

S_A é matriz de sensibilidade, de ordem $NJ \times NVC$, que relaciona as injeções de potência das barras PV e PQ com as variáveis de controle $\Delta \underline{u}$, isto é:

$$S_A = \begin{bmatrix} SPV,VG & SPV,a \\ SPQ,VG & SPQ,a \\ RPQ,VG & RPQ,a \end{bmatrix}$$

NVC = número de variáveis de controle

Onde:

- $SPV,VG = \partial P_{PV} / \partial V_G$ e $SPV,a = \partial P_{PV} / \partial a$ são as submatrizes de derivadas de potência ativa das barras PV com respeito às magnitudes de tensão das barras de geração e aos taps dos transformadores, respectivamente.
- $SPQ,VG = \partial P_{PQ} / \partial V_G$ e $SPQ,a = \partial P_{PQ} / \partial a$ são as submatrizes de derivadas de potência ativa das barras PQ com respeito às magnitudes de tensão das barras de geração e aos taps de transformadores, respectivamente.
- $RPQ,VG = \partial Q_{PQ} / \partial V_G$ e $RPQ,a = \partial Q_{PQ} / \partial a$ são as submatrizes de derivadas de potência reativa das barras PQ em relação às magnitudes de tensão das barras de geração e aos taps dos transformadores, respectivamente.

Através do uso de matrizes de sensibilidade (ver equação 3.9) podem ser obtidos, na forma linearizada, os incrementos para magnitudes de tensão nas barras de carga, potência reativa das barras de geração e potência ativa da barra de folga em relação às variáveis de controle [92].

3.5 - CONCLUSÕES

Os métodos de otimização geralmente vêem o controle de reativos como uma forma de diminuir perdas, não buscando especificamente uma otimização no perfil de tensões. Além disso, os métodos mais poderosos disponíveis consomem demasiado tempo computacional para sistemas de grande porte, dificultando sua aplicação em tempo real.

A falta de integração destes métodos com o operador e com outros programas disponíveis pode ser resolvida através da utilização de técnicas de inteligência artificial, que serão apresentadas no capítulo a seguir.

O método que é aplicado neste trabalho envolve técnicas de sistemas especialistas, que tornam possível implementar uma solução corretiva com o menor número de controles alterados. Esta costuma ser uma função objetivo sugerida na literatura [80], mas de difícil formulação matemática.

Este método também possibilita o tratamento às mudanças topológicas, que podem ser uma opção quando a solução do FPO não for encontrada através dos controles convencionais [90].

Este processo requer a disponibilidade das sensibilidades das tensões nas barras de carga em relação às variáveis de controle. O controle através da alteração na posição dos

taps e tensão de geração é tratado via sensibilidades e os chaveamentos de LT's e elementos shunt por regras específicas.

Foi desenvolvido pelo Grupo de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSPOT), o programa "Sensib" [100], que tem opções para cálculo das sensibilidades para taps de transformadores, tensão de geração e injeções de potência reativa como variáveis de controle. Este programa é acoplado a um fluxo de potência e fornece os dados sobre sensibilidades ao sistema especialista.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS ESPECIALISTAS E SUAS APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

4.1 - INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS BASEADOS NO CONHECIMENTO

Pode-se chamar de inteligência artificial a simulação de processos associados à inteligência em humanos, o que é diferente da simulação do verdadeiro comportamento inteligente [58]. Toda a pesquisa relacionada a robôs, processamento da linguagem natural e sistemas tomadores de decisão é chamada investigação ou estudo de inteligência artificial (IA).

A parte da inteligência artificial que procura habilitar computadores para que possam analisar problemas e sugerir soluções da maneira como faria um especialista na área é chamada "sistemas especialistas", ou mais especificamente "sistemas especialistas baseados no conhecimento" [29]. Para tanto é necessário fornecer ao computador uma base de conhecimento constituída por fatos e regras chamadas de "heurísticas" formados a partir da experiência de um especialista da área.

Geralmente os problemas que não têm tratamento algorítmico como interpretação, previsão, diagnósticos, projeto, treinamento, controle, etc, são os que melhor se adaptam a esta técnica.

A figura 4.1 mostra os vários níveis de software que existem entre o problema tratado por um sistema especialista e o hardware do computador.

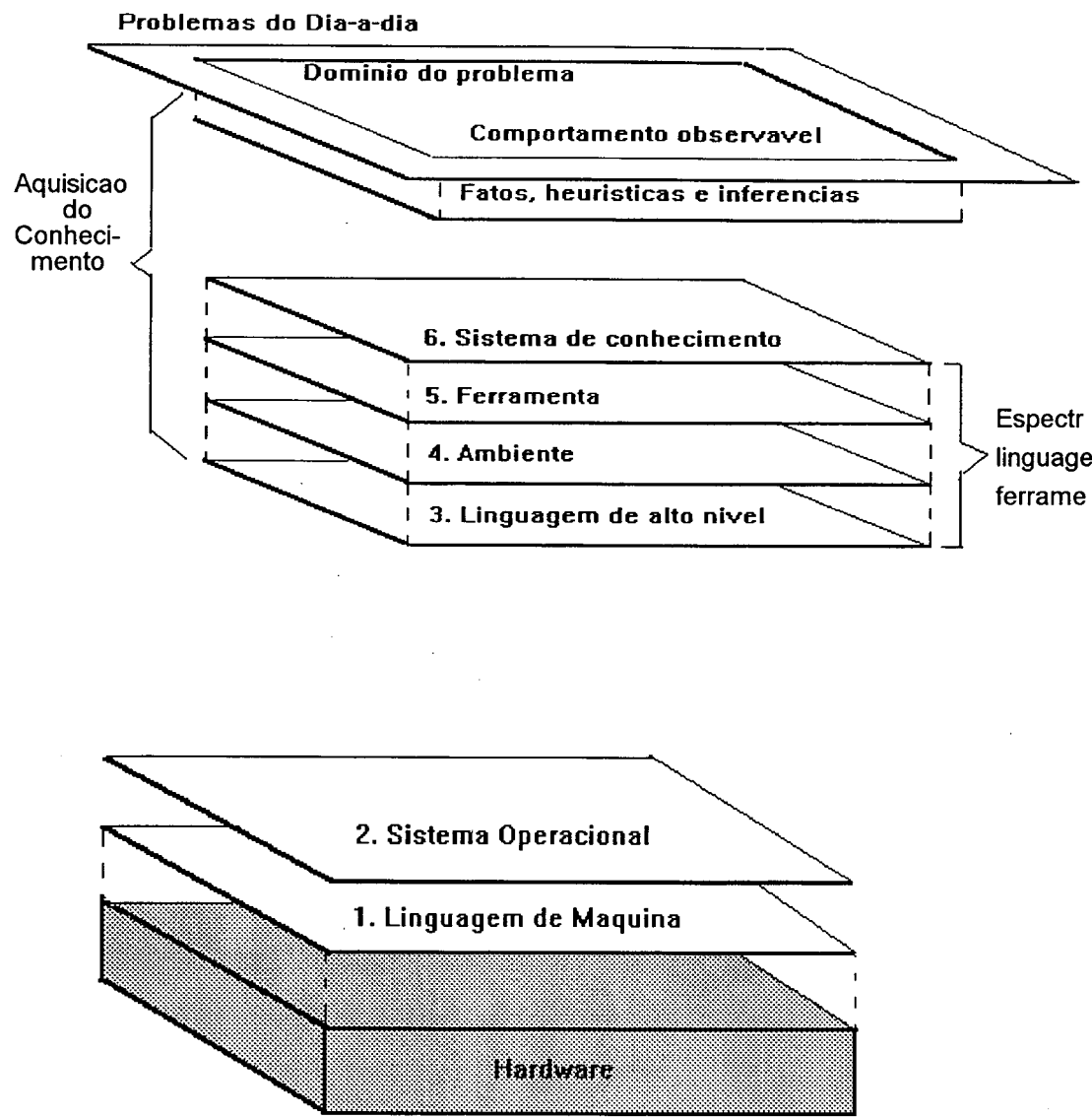


Figura 4.1 - Níveis de Software entre o Problema e o Hardware do Computador

No nível superior está o problema que se deseja tratar e no último a máquina onde o programa vai rodar. As linguagens de alto nível (nível 3 da figura 4.1) usualmente empregadas por programadores de IA são LISP e PROLOG, e o chamada "meio" (nível 4) são programas que são úteis em determinadas tarefas. As ferramentas do nível 5 são projetadas para facilitar o desenvolvimento do sistema baseado no conhecimento e incorporam aspectos específicos sobre representação e controle.

Quando uma ferramenta é combinada com o conhecimento sobre um domínio específico, o resultado é o sistema do nível 6. A diferença básica entre sistemas especialistas e os programas tradicionais é que os primeiros manipulam conhecimento e os segundos dados. Em sistemas especialistas o conhecimento específico para a resolução do problema é estabelecido como uma entidade separada, ou base de conhecimento, e não implicitamente, misturado à codificação do problema [56].

Na maioria dos casos um sistema especialista passa pelos seguintes estágios de desenvolvimento [31]:

- protótipo para demonstração: o sistema mostra que se trata de uma alternativa viável, resolvendo parte do problema;
- protótipo para pesquisa: o problema inteiro é tratado, mas com fragilidades em alguns pontos;
- protótipo de campo: o sistema foi revisado com base em testes extensivos no meio usuário e apresenta bom desempenho e confiabilidade;
- modelo de produção: com alta qualidade, confiabilidade e rapidez;
- sistema comercial: comercializado regularmente.

Poucos sistemas alcançam as duas últimas etapas.

Algumas das vantagens do sistema especialista são a permanência e a consistência. Especialistas humanos são influenciados por situações externas ao problema, e

mesmo de ordem pessoal, podendo tomar decisões diferentes para a solução do mesmo problema em diferentes ocasiões. Embora especialistas humanos tenham a vantagem de ver o problema em um contexto maior, enquanto sistemas especialistas, pelo menos até o momento, tendem a visualizar o problema em um horizonte limitado, estes últimos não se cansam, não se distraem e nem precisam de treinamento para manter sua eficiência. No aspecto manutenção os sistemas especialistas também apresentam vantagens pois, devido a sua modularidade, estes sistemas são mais fáceis de se modificar que programas em linguagem procedimental desde que, obviamente, a pessoa responsável pela tarefa tenha alguma experiência com a linguagem ou shell utilizado no sistema [68].

Será apresentada no item 4.2 a estrutura básica de um sistema especialista, dando destaque às formas de representação do conhecimento, no item 4.3 serão vistas técnicas para verificação e validação dos mesmos e no item 4.4 as aplicações de sistemas especialistas em Sistemas de Potência e no item 4.5 as conclusões.

4.2 - ESTRUTURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

Para que seja possível o desenvolvimento de um sistema especialista é essencial que se obtenha e organize o conhecimento. Fatos isolados não são considerados "conhecimento". Um fato se torna conhecimento quando combinado com a capacidade humana de interpretá-lo [58]. A base de conhecimento, ou seja, as informações que o computador necessita para se portar como um especialista em determinado domínio, pode ser adquirida de literatura técnica, manuais e através de entrevistas com um ou mais especialistas na área. A aquisição do conhecimento é o processo de traduzir conhecimento implícito para uma forma explícita, que de alguma maneira vai ser representado e incluído de uma forma eficiente,

consistente, e completa no sistema especialista. Para tanto é necessário estabelecer uma relação entre o(s) especialista(s) e o engenheiro de conhecimento que cuidará da modelagem deste conhecimento. Esta não é uma tarefa simples, por vários motivos entre os quais podemos citar:

- o conhecimento deve ser completo, ou seja, todos os casos devem ser cobertos;
- o conhecimento deve ser expresso com simplicidade, pois regras simples são mais fáceis de entender e fazer manutenção que regras complexas [61];
- a base de conhecimento deve ser elaborada de maneira clara e consistente para evitar trabalho extra na etapa de verificação e validação ou em uma eventual manutenção.

A aquisição de conhecimento pode ser feita através de uma interação direta com o especialista ou em alguns casos através de programas computacionais específicos para interagir com o mesmo. A forma direta é a mais utilizada e pode ainda ser dividida em vários tipos de entrevista, observação do especialista em atuação, simulação de cenários, etc.

A base de conhecimento de um sistema especialista é composta de fatos e relacionamentos que podem ser representados de diversas maneiras, entre as quais incluem-se:

- Redes Semânticas

Compostas pelos conjuntos de nós e arcos, direcionais ou não, ligando estes nós. Os nós são utilizados para representar objetos e os arcos relações entre os nós, como mostrado no exemplo da Figura 4.2.

A rede e as relações mostradas podem ser expandidas à medida que novas informações sobre os elementos são obtidas. O conhecimento representado desta forma se assemelha bastante à linguagem e pode fazer uso da propriedade de “herança” [29].

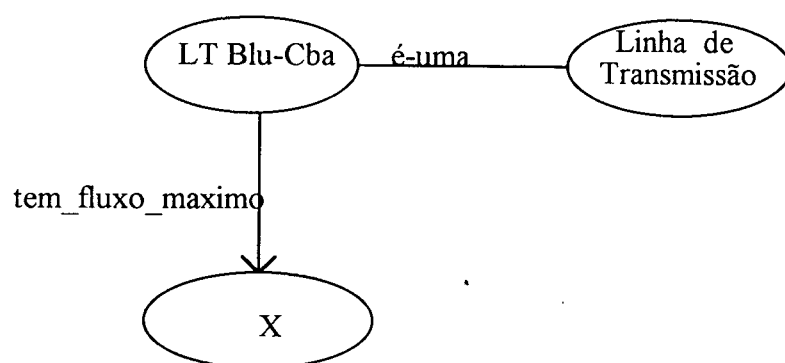


Figura 4.2 - Rede Semântica

- Frames

Os “frames” são outra forma de organizar o conhecimento e apresentam semelhanças com as redes semânticas. Um frame contém a descrição de um objeto e sua estrutura é similar aos registros em bases de dados antigas, como por exemplo:

barra:
 tensão_atual:
 tensão_máxima:
 tensão_mínima:

A estrutura do frame tipo “barra” é dito ter três “slots”: tensão atual, valor máximo e mínimo, os quais devem ser preenchidos com um valor particular para completar as informações. Os slots contém propriedades associadas ao objeto ou podem conter valores *default*, apontadores para outros frames, conjuntos de regras ou procedimentos através dos quais valores possam ser obtidos.

- Triplas Objeto-Atributo-Valor

A representação por triplas objeto-atributo-valor é na verdade um caso particular das redes semânticas. Aqui os nós são classificados em três categorias: objetos, atributos ou valores e as ligações do tipo “é-um(a)” e “tem-um(a)” são preferidas.

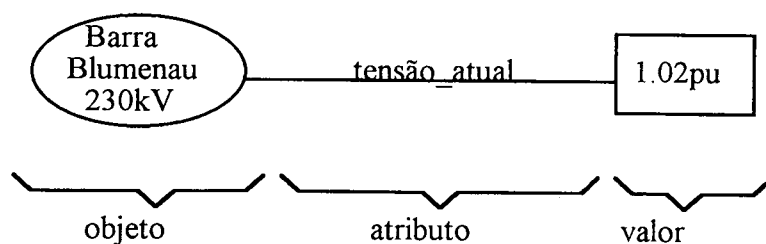


Figura 4.3 - Tripla Objeto-Atributo-Valor

As triplas O-A-V podem ser estruturadas de forma que os objetos sejam relacionados entre si.

- Expressões Lógicas

As duas formas mais comuns de representação lógica são a lógica proposicional e a de cálculo de predicados [29]. Na lógica proposicional as afirmações são consideradas verdadeiras ou falsas e proposições podem ser ligadas por conectivos do tipo:

E, OU, NÃO, EQUIVALENTE e IMPLICA

Se, por exemplo, a proposição A é verdadeira e a proposição B é falsa, então a proposição “A E B” é falsa.

No cálculo de predicados são feitas afirmações sobre predicados representadas da forma:

é_vermelha(bola)

que diz que a bola é vermelha. Conectores também podem ser empregados para criar expressões do tipo:

filha_de(Roberto) E mãe_de(Pedro).

A formulação lógica permite que se obtenha dados sobre os fatos armazenados. Estes dados podem ser nomes de nós, valores associados a objetos e atributos, etc.

- Regras

As regras são o tipo mais popular de representação do conhecimento [31], e apropriado ao domínio formado a partir da experiência que os especialistas desenvolvem resolvendo problemas na área de sistemas de potência por exemplo. Elas são úteis para traduzir o conhecimento organizado na forma premissa/conclusão ou situação/conclusão [44], e são estruturadas da forma IF-THEN. Por exemplo, pode-se observar a seguinte regra:

Premissa *If* Tensão em determinada barra está fora dos limites permitidos.
 Conclusão *Then* Selecionar controle para o problema.

Quando a parte "if" de uma regra é satisfeita, a ação especificada na porção "then" é executada.

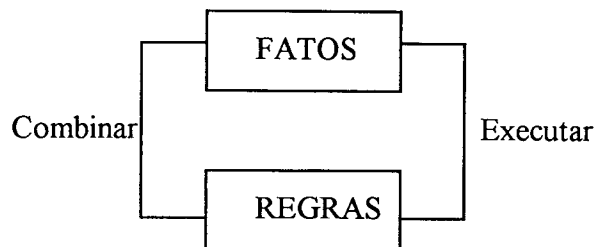


Figura 4.4 - Conhecimento estruturado em regras de decisão

A escolha de uma forma de representação é um passo crítico no projeto de um sistema especialista e está diretamente ligada ao mecanismo de acesso que será utilizado [58].

A fim de obter-se um sistema especialista é necessário, além da base de conhecimento, um motor de inferência, como pode ser observado na figura 4.5. A base de conhecimento contém fatos(dados) e regras, e o motor de inferência contém um interpretador, que decide como, e um organizador, que decide quando e em que ordem aplicar diferentes partes do domínio de conhecimento [31], procurando dar uma solução ao problema. A

separação entre a base de conhecimento e o motor de inferência é uma das características básicas dos sistemas especialistas.

O mecanismo de inferência pode ter busca com encadeamento para frente ou para trás. No encadeamento para frente, também chamado de direcionado pelos dados, cada regra é casada com dados ou fatos da memória de trabalho e as regras cujas condições são satisfeitas são disparadas. No encadeamento para trás, também chamado de direcionado por metas, uma hipótese é formada e o conjunto de regras é pesquisado para tentar provar que a meta é verdadeira.

O PROLOG é uma linguagem declarativa, projetada para tratar de problemas lógicos e que se tornou popular após o início do projeto dos computadores japoneses de quinta geração [33]. Para utilizá-la incluem-se os fatos e regras sobre determinado domínio e depois solicitam-se metas, as quais seguem uma forma lógica de combinação destes fatos e regras.

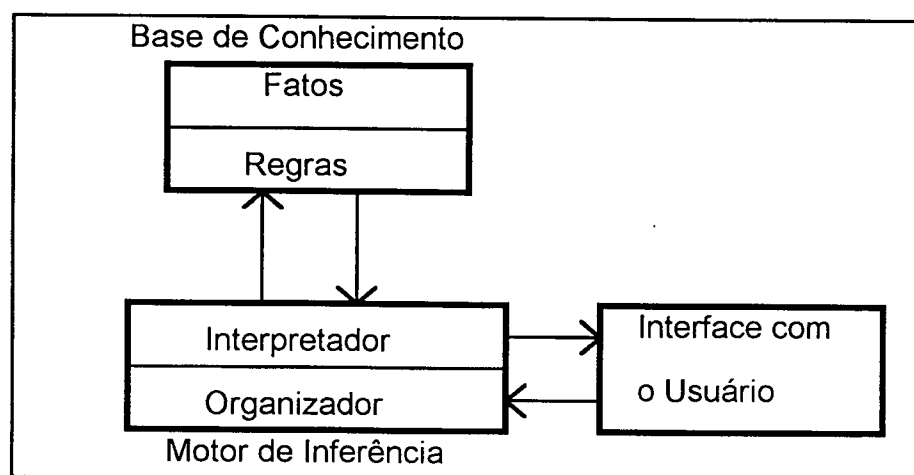


Figura 4.5 - Estrutura de um Sistema Especialista

A característica principal do motor de inferência do PROLOG é o algoritmo de unificação. Dada uma meta M , o motor de inferência tenta provar M (encadeamento para trás) procurando por uma regra tal que "case" com M . Durante este "casamento" a parte variável da

condição é instanciada. As regras são procuradas na ordem em que aparecem no programa. Quando o motor de inferência faz uma unificação da meta com a parte conseqüente de uma regra, passa então a tentar provar a parte antecedente desta regra. Se em algum momento não for possível provar a meta, o motor de inferência volta, tentando re-satisfazer uma meta anterior de outra forma, gerando novos instanciamentos e novas submetas. Alguns mecanismos existentes no PROLOG possibilitam ao programador controlar este processo de busca de forma apropriada, eliminando por exemplo, buscas em direções indesejadas. Nesta linguagem o motor de inferência (máquina dedutiva) já está embutido, não sendo necessário que o projetista o desenvolva e implemente.

Embora sistemas especialistas possam ser construídos em linguagens convencionais como C ou FORTRAN, estas linguagens apresentam desvantagens em relação às estruturas de representação de conhecimento. Por este motivo o desenvolvimento de sistemas especialistas em linguagens mais apropriadas simplifica a sua construção. Em [71] Huneault e outros fazem uma análise das linguagens e ferramentas empregadas nas aplicações de sistemas especialistas na área de sistemas de potência, a partir de uma revisão na literatura técnica e de respostas a questionários enviados aos principais grupos que desenvolvem projetos nesta área. Foram identificados nestas aplicações vinte ferramentas e onze linguagens, sendo que, dentre as linguagens, a mais utilizada foi o PROLOG. Trata-se de uma linguagem de programação lógica, que também será empregada no presente trabalho, descrito no capítulo 5.

A interface com o usuário (ver Figura 4.5) é responsável pela conexão entre o sistema especialista e o usuário, desde a etapa inicial, quando o usuário fornece uma meta, até a etapa final quando o sistema explica ao usuário como chegou a determinada solução. Em um sistema especialista construído utilizando linguagem de programação (numérica ou simbólica) a interface com o usuário também deve ser projetada, mas a mesma já faz parte dos recursos disponíveis quando se emprega algum dos chamados “shells”.

Os *shells* podem ser compreendidos como sistemas especialistas prontos mas com a base de conhecimento vazia, e por já incluírem várias facilidades, como interface com o usuário, capacidade de explicar como chegou a determinada decisão (processo de inferenciação), ferramentas gráficas, etc, tornam mais simples o trabalho inicial de formação de um protótipo. No entanto podem apresentar alguma limitação quanto à forma de representação do conhecimento, mecanismo de inferência e velocidade de processamento [53]. Alguns exemplos de “shell” são: NEXPERT, KAPPA, GENESIA. Um outro exemplo de “shell” que vem sendo bastante utilizado é o G2 [66] , desenvolvido pela Gensym. O G2 é uma ferramenta poderosa para desenvolvimento de aplicações tais como controle e monitoração em tempo real e diagnóstico de faltas. Suas facilidades incluem representação do conhecimento na forma orientada a objeto, interface com o usuário, conexão simples com bases de dados existentes, simulador integrado para possibilitar testes, etc. Todas estas condições simplificam o desenvolvimento de aplicação em troca de um custo mais alto. A escolha da linguagem ou “shell” a ser empregado deve ser feita através de uma análise custo-benefício, dentro das possibilidades do projeto.

Além das linguagens de programação voltadas para a inteligência artificial e os *shells* há os ambientes de programação, como por exemplo o POPLOG, que inclui em um único pacote várias linguagens simbólicas como o LISP e o PROLOG, possibilitando interface com linguagens convencionais em um ambiente amigável. Este sistema foi utilizado durante um período deste trabalho e se encontra descrito no capítulo 5.

Os sistemas especialistas possuem ainda condições de lidar com incertezas nas regras e fatos. No caso dos fatos a imprecisão está relacionada com algumas variáveis linguísticas utilizadas por especialistas, como alta, baixa, média, normal, etc, de difícil quantificação. No caso da tensão em uma barra por exemplo, se define-se como alta a tensão

maior que 1.05 pu, isto vai implicar no fato da tensão igual a 1.050 ser tratada como normal e uma igual a 1.051 ser tratada como alta.

No caso de regras o problema vem também da própria incerteza na tradução do conhecimento heurístico do especialista para a forma de regras, que em alguns casos são válidas apenas para determinadas condições [45]. Por exemplo pode-se observar a seguinte regra:

Se horário atual maior que 18:00 h e não é domingo ou feriado, o sistema está operando em carga pesada.

Para lidar com incerteza nas regras podem ser empregados fatores de certeza [61], que têm valores que variam de +1 a -1 e expressam a probabilidade das condições da regra serem verdadeiras. A partir de fatores associados às condições é possível obter-se o fator de certeza da conclusão de um regra [45].

Estas técnicas de fatores de incerteza e similares são casos de lógica nebulosa [57,102], a qual proporciona a possibilidade de substituir valores absolutos por variáveis linguísticas, que por sua vez podem ser tratados por regras heurísticas [61].

4.3 - VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

Uma etapa que consome bastante tempo dos engenheiros de conhecimento é a de verificação e validação dos sistemas especialistas. A definição formal destes termos é a seguinte [61]:

Validação: Processo de avaliar o software ao final do desenvolvimento para assegurar concordância com os requisitos do mesmo.

Verificação: Processo de determinar quando ou não os produtos de uma determinada fase de desenvolvimento do software atingem os requisitos estabelecidos em uma fase anterior.

Muitas vezes o especialista que participou da etapa de aquisição do conhecimento também participa desta etapa de validação, verificando se as respostas fornecidas pelo sistema especialista são adequadas. Mas como teoricamente todas as situações possíveis devam ser testadas para assegurar a confiabilidade do sistema, a presença do especialista não é suficiente em muitos casos, onde mesmo para um pequeno domínio de conhecimento, o número de situações torna este tipo de teste impossível.

Uma opção bastante comum é executar-se testes por módulos, e posteriormente um conjunto de testes com o sistema completo, para verificar a interação dos módulos entre si. Aconselha-se que esta etapa não seja executada pela mesma pessoa que desenvolveu o sistema e sim pelo usuário final [61]. Um outro conselho bastante útil é o de fazer os testes ao final de cada passo do projeto, não deixando-os para uma etapa final.

Os testes de validação podem ser mais abrangentes quando feitos através de um modelo analítico, ou seja, um simulador, também nem sempre disponível.

Em [40] é apresentado um algoritmo para testar bases de conhecimentos constituídas somente por regras de produção. Estes testes verificam duplicação de regras, conflitos ou descontinuidade entre as mesmas, além de outros problemas. A idéia por enquanto é só aplicável a pequenos conjuntos de regras.

Tomsovic e Barruncho em [39] sugerem o uso de redes de Petri no processo de avaliação de um sistema especialista para controle de tensão, e Terano [67] fornece listas de todos os itens e funções que devem ser avaliados em sistemas especialistas desde a etapa de identificação do problema e aquisição do conhecimento até métodos possíveis para verificação dos resultados fornecidos.

O problema na validação de um sistema especialista e o tempo necessário para aceitação desta nova ferramenta é que normalmente o fazem ser apresentado como um auxílio na tomada de decisões e não como um tomador de decisões [61] pois um sistema que

implementasse diretamente os controles sugeridos deveria ser altamente confiável e de preferência fornecer soluções otimizadas. O que acontece normalmente é o sistema especialista fornecer uma solução viável, mas é possível que o operador tenha razões para não seguir alguma recomendação do sistema ou ainda que ele seja capaz de encontrar ações de controle alternativas [69], portanto os controles devem ao menos receber liberação por parte do operador antes de serem executados.

4.4 - APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Uma das aplicações de sistemas especialistas em sistemas de potência é no treinamento de operadores de subestações e usinas e de despachantes nos centros de operações do sistema, pois além do seu processo de busca de solução ser similar ao humano, a sua capacidade de explicar como encontrou determinada solução para um problema torna este tipo de sistema particularmente didático.

Outro objetivo da utilização de sistemas especialistas é liberar o operador de tarefas rotineiras ou apoiá-lo no processo de tomada de decisões, especialmente em condições de emergência, quando grande número de informações são fornecidas simultaneamente e o tempo de decisão é curto. Pesquisas mostram que a idade média dos operadores tem diminuído [55], assim como o seu tempo de experiência. O aumento da confiabilidade dos sistemas também diminuiu o número de ocorrências graves e consequentemente as oportunidades dos despachantes lidarem com este tipo de situação. Contudo o número de faltas causadas por fatores humanos continua o mesmo [55].

Antes de se optar pela utilização de técnicas de inteligência artificial ao invés de tecnologia convencional devem ser analisados os benefícios que poderão ser obtidos e a

possibilidade de desenvolvimento do sistema a partir das tecnologias existentes [30]. As aplicações mais populares na área de operação de sistemas de energia elétrica de grande porte são o tratamento de alarmes e controle restaurativo. No entanto, se o problema em questão possui ferramentas apropriadas e disponíveis, com tecnologia dominada, não se recomenda o uso de sistemas especialistas [56]. Nem sempre há especialistas disponíveis na área de interesse. Quando isto acontece deve-se antes fazer uma pesquisa sobre o problema em questão antes de se iniciar o desenvolvimento do SE [61].

De maneira geral os sistemas especialistas são aplicáveis para resolver problemas em sistemas de potência para os quais [59]:

- nenhum método analítico é conhecido. Por exemplo, no processamento de alarmes e diagnósticos de faltas;
- métodos analíticos são parcialmente conhecidos. Por exemplo, pré-despacho, programação de manutenção, controle de reativos e controle restaurativo;
- métodos analíticos são conhecidos mas ineficientes como no caso da avaliação de contingências.

Cabe ressaltar que incertezas em relação aos fatos e regras incluídos na base de conhecimento levam a incertezas na solução. Desta forma a eficiência das soluções fornecidas está diretamente ligada à qualidade do conhecimento embutido. Além dos fatores citados anteriormente, é necessário que se tenha disponível o conhecimento especializado confiável no domínio de interesse e que o sistema desenvolvido seja rápido e capaz de justificar as decisões apresentadas [48].

Um problema que normalmente aparece quando se opta pelo uso de sistemas especialistas em sistemas de potência é o de como integrá-lo com outras ferramentas, normalmente numéricas, existentes no centro de controle [66]. Por exemplo, no sistema especialista desenvolvido em [60], para energização de linhas pouco carregadas, é necessário

que se forneçam dados resultantes do fluxo de potência; e no sistema desenvolvido em [38], para alívio de sobrecargas em linhas, são necessários dados vindos da estimação de estados e de outro programa que calcula sensibilidades.

A combinação de processamento lógico e busca heurística com modelos analíticos formam novas ferramentas com características que não poderiam ser obtidas por uma das técnicas isoladamente. Em alguns casos sistemas especialistas podem inclusive ser utilizados para fazer ligação entre um operador humano e programas numéricos mais complexos que resolvem algumas tarefas na operação dos sistemas elétricos.

Quando diferentes “hardware” são empregados, a forma mais simples de integração é através do usuário, mas também podem ser empregados discos ou fitas para transferência de dados e, em um passo mais adiante, redes de computadores que se comunicam através de cabos padrão Ethernet e protocolos de comunicação [50].

Quando o sistema especialista utiliza o mesmo processador que os programas algorítmicos a integração dos softwares pode ser através de compartilhamento de arquivos (o que exige interface para adaptação de formatos); processos que cuidam da comunicação e que atuam enviando mensagens e dados entre diferentes módulos; sistemas administradores tipo “quadro negro” e chamada de funções, onde programas rodam após chamada com os dados necessários à sua execução. Módulos compartilhando as mesmas posições de memória representam a conexão mais firme, com vantagens em relação à velocidade porque eliminam dados redundantes. Este tipo de integração normalmente significa compilar e editar as ligações do sistema completo, como ocorre na interface entre C e OPS83. Na referência [66] é mostrada a solução encontrada para integração de um sistema especialista CONDE, em C, de auxílio ao operador nas manobras em operação normal e de emergência. Neste caso funções auxiliares possibilitam o compartilhamento da base de dados em um centro de operações entre o sistema especialista e ferramentas numéricas. No capítulo 5 serão mostrados alguns outros exemplos

onde a interface entre programação convencional e simbólica é necessária e a solução encontrada para o sistema desenvolvido neste trabalho.

Os artigos [49], [55] e [71] dão uma visão geral da aplicação de sistemas especialistas em sistemas de potência e os congressos “ESAPS - Expert Systems Application to Power Systems” de 88,89,91 e 93 foram voltados apenas a aplicações nesta área. A partir de 94 este congresso passou a se chamar “ISAP - Intelligent Systems Applications to Power Systems”.

4.5 - CONCLUSÕES

Os sistemas especialistas, ou mais especificamente, os sistemas baseados no conhecimento, são sistemas que tendo embutido conhecimento sobre determinado domínio, são capazes de resolver problemas nesta área específica, ou seja, mais do que um arquivo de conhecimento, os sistemas especialistas permitem que o mesmo seja explorado e utilizado de maneira interativa.

Ao contrário dos programas convencionais onde uma sequência de ações é descrita, o sistema especialista possui no seu corpo descrições de fatos e relacionamentos que compoem a base de conhecimento e um mecanismo de inferência, que atua sobre a base de conhecimento, procurando responder questões e dar soluções similares a que um especialista daria. Em relação aos programas tradicionais o sistema especialista tem a vantagem de poder trabalhar com conhecimento incerto ou incompleto e poder explicar o ‘raciocínio’ que o levou a determinada conclusão. São portanto particularmente aplicáveis a problemas que não possuem tratamento numérico.

No caso de sistemas de potência a maior parte das aplicações se encontram nas categorias de monitoramento e controle em tempo real [45], as quais visam dar apoio a despachantes nos centros de controle, evitando problemas causados por decisões tomadas sob pressão por pessoas nem sempre com experiência suficiente.

A construção de um sistema baseado no conhecimento passa por várias etapas, sendo crucial para o seu sucesso a de aquisição e representação do conhecimento da sua área de atuação.

Grande parte dos sistemas especialistas aplicados a sistemas de potência necessitam trocar informações com programas convencionais existentes nos centros de operação, o que requer o desenvolvimento de alguma forma de interface que possibilite esta comunicação entre os mesmos.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA APLICADO AO CONTROLE DE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA

5.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo da construção de um sistema especialista para controle de tensão é desenvolver uma ferramenta que apresente rapidamente ao operador alternativas para controle em condições normais e de emergência. A introdução destes sistemas nos centros de controle da operação deve ser feita de maneira gradual, de forma a verificar sua eficiência e acostumar o usuário com a nova ferramenta disponível [48].

O conhecimento específico no domínio controle de tensão/potência reativa é bem desenvolvido. Usualmente, quando alguma barra no sistema de potência apresenta problemas de violação no seu limite inferior ou superior de tensão, o despachante toma uma decisão de controle, dentre variar tensões de geração, posições nos taps de transformadores e/ou chavear bancos de capacitores/reatores shunt, de forma a manter um perfil pré-determinado nas tensões [48]. A nível de análise de contingências, o sistema especialista pode ser aliado a um fluxo de potência ótimo, para armazenar o conjunto de ações necessárias no caso da ocorrência da contingência em análise [48].

Neste capítulo serão tratados aspectos do sistema especialista desenvolvido no decorrer deste trabalho (SECTE - Sistema Especialista para Controle de Tensão). No item 5.2 será feita uma revisão bibliográfica dos artigos na área; no item 5.3 são descritos detalhes da aquisição/representação do conhecimento, motor de inferência e linguagem utilizada neste trabalho; no item 5.4 são mostradas as opções de interface via arquivo e utilizando o sistema POPLOG e no item 5.5 são apresentadas as conclusões.

5.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os sistemas especialistas na área de controle de reativos podem ser empregados para previsão de problemas de tensão em casos pós-contingências [25,36] e solução destas situações [35]; reconhecer situações de riscos de colapso de tensão em futuro próximo e evitá-las [65]; manter o perfil de tensão no sistema próximo à solução proposta por um fluxo de potência ótimo [52]; auxiliar o operador na tarefa de energizar linhas em períodos de carga baixa [60] ou após contingências mais severas [42]; ou ainda apoiar o operador na busca de soluções rápidas e viáveis para eventuais problemas de tensão na rede durante operação normal, como é o caso do sistema aqui desenvolvido e de vários outros descritos a seguir.

O primeiro artigo encontrado na pesquisa bibliográfica nesta área foi o de Liu e Tomsovic [26], publicado em 1985 e que apresenta o sistema especialista para controle de tensão chamado VCES. As heurísticas básicas apresentadas neste artigo e também consideradas no desenvolvimento do SECTE são as seguintes:

(a) Se a tensão em uma barra de carga desce abaixo (sobe acima) do limite operacional, dispositivos de controle como capacitores shunt, taps de transformadores, tensões de geração e

condensadores síncronos podem ser chaveados ou ajustados para atingir o perfil de tensões normal.

(b) Se a tensão em uma barra de carga desce abaixo (sobe acima) do limite operacional, é mais eficiente aplicar compensação reativa localmente. Se a capacidade dos compensadores locais é insuficiente para resolver o problema de tensão, então um outro compensador, com a sensibilidade mais alta dentre os restantes, será selecionado.

(c) Se a tensão está baixa (alta) em uma determinada barra, a posição do tap do transformador local pode ser aumentada (reduzida) para corrigir o problema. Entretanto, aumentar (diminuir) a posição do tap pode levar a uma queda (elevação) da tensão em outras barras.

(d) Tensões nas barras de geração podem ser elevadas (reduzidas) para resolver os problemas de subtensão (sobretensão) nas barras de carga, pois quando se eleva (reduz) a tensão em uma barra de geração as tensões nas barras de carga também se elevam (reduzem).

Este mesmo sistema especialista (VCES) faz parte do trabalho apresentado em [36] para previsão e correção de problemas de tensão causados por contingências e foi aprimorado para ser incluído no projeto tratado na sequência de artigos [43],[47],[52] para controle de tensão.

No primeiro artigo da sequência [43] o trabalho está ainda em fase preliminar e tem o objetivo de coordenar ferramentas numéricas de otimização com outras baseadas no conhecimento, instaladas no centro de operações do sistema, para apoiar o operador no processo de tomada de decisões relativas ao controle de tensão/potência reativa. O projeto propõe lidar com a operação do sistema português, que apresenta problemas similares aos do nosso sistema, ou seja, subtensões em horários de pico, sobretensões em períodos de carga leve e alguns casos de necessidade de desligamento de linhas altamente capacitivas em períodos de carga mínima. No segundo artigo de série [47], publicado dois anos após o primeiro, já são descritos resultados obtidos da implementação do sistema completo. O fluxo de potência ótimo

é executado de hora em hora (objetivo de redução de perdas) e o sistema baseado no conhecimento busca resolver problemas de tensão que surjam neste intervalo e apresentados na forma de alarmes. Da mesma maneira que o VCES original o sistema baseia-se em sensibilidades calculadas a partir da matriz Jacobiana do fluxo de potência. Na referência [52] são detalhados aspectos da interface entre os vários módulos, bases de dados e o sistema especialista, construído em OPS83, no ambiente HABITAT.

O uso de fatores de sensibilidade para selecionar controles, calcular variação necessária no controle para eliminar violações e estimar o efeito desta alteração sobre as demais barras é comum em praticamente todos os artigos de sistemas especialistas para controle de tensão [26,27,35,37,41,43,47,51,52,53,54,62,63,64,69]. O cálculo destes valores é obtido de diversas formas, dentre as quais podemos citar a inversão da matriz B'' do fluxo de potência desacoplado rápido como apresentado nas referências [54] e [63] ou a expansão das equações do fluxo de potência completo como apresentado no capítulo 3 deste trabalho e na referência [41]. No trabalho publicado em [46] a seleção dos controles é feita baseado em um índice composto pela soma ponderada de outros índices que traduzem a estabilidade em regime permanente, qualidade do perfil de tensões (procura-se mantê-lo próximo ao especificado), aumento das perdas de potência ativa no sistema e sensibilidade linear dos controles versus barras de carga.

Os controles considerados costumam ser unidades geradoras, capacitores e reatores shunt, posição de tap de transformadores e compensadores síncronos mas na referência [69] os autores empregam a retirada de linhas em casos bastante especiais para controle de tensão, aparentemente de maneira similar ao que o SECTE faz.

Embora os sistemas descritos apresentem vários pontos em comum, apresentam também algumas características particulares, como na referência [62] onde as contingências mais severas são selecionadas de acordo com suas margens de segurança de estabilidade de

tensão, e o sistema possui também um módulo para alocação de novas fontes de reativos; e nas referências [51] e [53] onde os sistemas lidam tanto com problemas de tensão quanto sobrecargas em LT's.

As linguagens empregadas nos sistemas variam dentre C [63,64], FORTRAN [54], TURBO PROLOG [46], PROLOG [37,51], LISP [53], OPS5 [26], OPS83 [35,52], ou ainda pacotes como o VP-EXPERT [62], NEXPERT [69] e KEE [41].

Dos artigos analisados apenas o sistema descrito nas referências [47] e [52] e o da referência [69] estão operando em centros de controle reais.

5.3 - OPÇÕES DE PROJETO

5.3.1 - Linguagem

Devido à restrições econômicas não foi considerada a possibilidade de se implementar o sistema aqui desenvolvido utilizando-se algum pacote, ficando então a escolha restrita entre as linguagens LISP e PROLOG. Após consultas com algumas pessoas que trabalham com sistemas especialistas na UFSC e considerando-se a estatística da referência [49], que mostra o PROLOG como a linguagem de inteligência artificial mais utilizada nos sistemas baseados em conhecimento desenvolvidos na Europa, optou-se por esta linguagem. Esta predominância do PROLOG nas aplicações de sistemas especialistas em sistemas de potência foi confirmada posteriormente em [71]. A versão empregada foi o SWI-PROLOG, de domínio público e desenvolvido na universidade de Amsterdam.

Um problema percebido após alguns meses de trabalho foi a dificuldade de interface do PROLOG com a linguagem FORTRAN, utilizada nos programas de fluxo de potência e cálculo de sensibilidades que fornecem dados ao sistema especialista. A solução encontrada

inicialmente foi a comunicação via arquivos e, posteriormente, no período do trabalho dispendido na Universidade de Brunel foi utilizado o sistema POPLOG, que possibilitou esta interface, conforme descrito no item 5.4.

5.3.2 - Aquisição do Conhecimento

Como este sistema não foi desenvolvido por um leigo no domínio do controle de tensão em sistemas de potência, o trabalho de aquisição do conhecimento não partiu de entrevistas com especialistas na área, mas sim da literatura técnica.

As primeiras regras listadas foram semelhantes às incluídas no sistema da referência [26], com diferenças basicamente em relação à classificação do nível de severidade do problema e no uso, em [26], de um programa de otimização empregando programação linear.

Como normalmente acontece durante o desenvolvimento de sistemas especialistas, à medida que a base de conhecimento foi sendo ampliada surgiu a necessidade de novas regras, como por exemplo, para lidar com transformadores em paralelo.

Quanto ao uso de chaveamentos de linhas, o conhecimento veio da análise de alguns relatórios da ELETROSUL, de onde inclusive surgiu a idéia para o desenvolvimento de um sistema especialista para controle de tensão que fosse capaz de lidar com estes procedimentos. As linhas consideradas chaveáveis e as condições de execução destes chaveamentos foram conhecidas através da leitura de manuais de operação do sistema sul-sudeste [101]. As dúvidas quanto aos detalhes de execução destes chaveamentos foram sempre esclarecidas por engenheiros da divisão de estudos do departamento de operação da ELETROSUL, e no caso dos chaveamentos na SE Timbó, pela CELESC.

A rigor, os especialistas considerados deveriam ser os despachantes no centro de operação e a aquisição de conhecimento deveria vir de entrevistas e/ou da observação dos mesmos trabalhando. Mas como esta tarefa necessitaria de maior envolvimento universidade-

empresa e os relatórios e manuais consultados incluem bastante detalhes do dia a dia da operação, sob condições normais e de emergência, estes foram aceitos para formação da base de conhecimento do SECTE.

5.3.3 - Representação do Conhecimento

PROLOG é uma linguagem lógica projetada para computação predominantemente lógica. Ao programar em PROLOG deve-se [29]:

- especificar alguns fatos sobre objetos e suas relações,
- especificar regras sobre objetos e suas relações,
- fazer perguntas sobre objetos e suas relações.

Para os dados do sistema (fatos) foi utilizada a modelagem objeto-atributo-valor. A partir do objetivo do sistema especialista, neste caso o controle de tensão, se procurou definir os objetos, as relações e os atributos de interesse. Pode-se observar na figura 5.1 o exemplo do objeto "violador", que contém informações sobre as barras cujas tensões estão fora dos limites permitidos de operação.

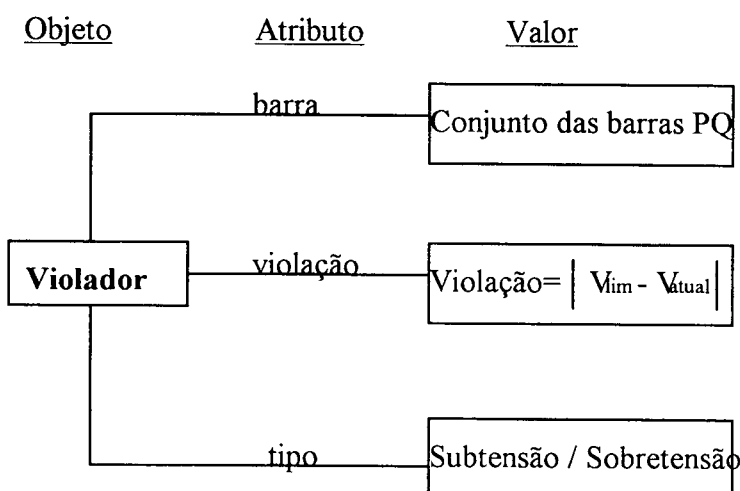


Figura 5.1 - Modelagem do objeto 'violador'

Os outros objetos/atributos principais incluídos no SECTE são:

- *barra(nome, v_atual, v_max, v_min)*

- nome - identificação da barra, informada pelo programa de fluxo de potência,
- v_atual: - valor da tensão atual, resultado do fluxo de potência,
- v_max - tensão máxima permitida na barra, definida de acordo com o período de carga, que por sua vez é obtido a partir do horário atual,
- v_min - tensão mínima permitida na barra, definida de acordo com o período de carga.

- *controlador(indice, classe, status, setting, steps, upper, lower, loca, extrem)*

- indice - identificação do controlador,
- classe - tipo do controlador, tensão de geração ou posição de tap de transformador,
- status - diz se o controlador está em operação ou não ou ainda se está em um dos limites,
- setting - ajuste atual do controlador,
- steps - passos em que o controlador pode ser alterado,
- upper - limite superior,
- lower - limite inferior,
- loca - barra onde está o controlador,
- extrem - no caso de transformador, identifica outra barra conectada ao mesmo.

Com exceção dos valores limites, que são definidos no SECTE de acordo com o período de carga, as informações são resultantes do fluxo de potência.

Uma vez que a opção por PROLOG já tenha sido feita, deve-se então estruturar o conhecimento na forma de regras. Existe uma regra principal no sistema desenvolvido em PROLOG que dispara todo o processo descrito no algoritmo a seguir.

Os dados iniciais sobre barras de carga e controladores são fornecidos por um fluxo de potência completo pelo método de Newton-Raphson.

Tarefa 1: Classificar o problema de tensão.

- Classificar período de carga e de acordo com o mesmo definir faixa permissível de tensão para as barras.
- Identificar as barras com problema de subtensão ou sobretensão. Se não há violações o sistema falha e pára. Se há violações é construída uma lista com o índice das barras com violações em ordem decrescente das mesmas e é construído um objeto 'violador' para cada uma destas barras.
- Determinar índice de severidade do problema, ou seja, se houver violações muito severas o sistema especialista pode aconselhar o uso de outra ferramenta.

Tarefa 2: Selecionar controladores

- Se existe algum problema de tensão, carregar arquivo que lista as sensibilidades na forma:

sensib(controle_x, barra_y, valor)

- Buscar os controles para a barra com maior problema ou a barra que o operador escolheu como prioritária. O controle é selecionado de acordo com sua sensibilidade em relação à barra com maior violação. Este é um processo simples uma vez que os valores de sensibilidades foram passados a base de dados de forma decrescente, de forma que ao consultar à base de dados sobre controladores para uma determinada barra, o mecanismo de inferência retornará com o controle cuja sensibilidade é a mais alta em relação a esta barra. Se este controlador não estiver disponível ou já estiver no limite no sentido em que seria necessário movê-lo, um outro é selecionado.

Tarefa 3: Implementar controles

- Se o compensador selecionado na tarefa 2 pode fornecer o controle necessário, fazer a compensação. Caso contrário mover este compensador até o limite.

Tarefa 4: Estimar os efeitos dos controles

- Estimar o efeito do controle fornecido pelo compensador nas tensões de todas as barras problema, utilizando os valores das sensibilidades do controle selecionado em relação às demais barras com violações. Se esta ação de controle piorar a situação do sistema o PROLOG volta à tarefa 2, buscando um novo controle.
- Se as tensões estimadas em todas as barras-problema estiverem dentro dos limites, verificar o efeito dos controles através de um fluxo de carga.
- Se as tensões estimadas em todas as barras-problema não estiverem dentro dos limites, selecionar o novo controle disponível.

As sensibilidades citadas na tarefa 2 são calculadas da maneira apresentada no capítulo 3 e implicam em um tratamento linearizado, embora o problema tensão/potência reativa tenha comportamento altamente não linear, assim as mesmas só são aplicáveis para pontos não muito afastados do ponto de operação normal. O ajuste necessário nos controles, assim como a verificação do efeito que causarão sobre as demais barras de carga do sistema também é calculado via sensibilidades, antes do controle ser escolhido definitivamente.

O fato do SECTE ser baseado em sensibilidades o torna simples e rápido mas quando as tensões se afastam demais do ponto de operação normal, decisões com intenção de corrigir o estado do sistema podem vir a danificá-lo ainda mais. Isto acontece porque algumas sensibilidades podem mesmo inverter seu sinal para tensões muito baixas, o que em um caso extremo de decisões inapropriadas poderia levar a um colapso de tensão [45]. Por isto o SECTE pode sugerir que se utilize outra metodologia para busca de soluções para estes casos ou ainda não conseguir encontrar uma resposta, uma vez que as mesmas são sempre verificadas por um fluxo de carga ao final do processo.

Este sistema considera a natureza discreta das posições de taps de transformadores, dá tratamento especial para transformadores em paralelo (alterações iguais e simultâneas das posições de tap) e considera os casos de usinas onde várias barras de geração são ligadas através de transformadores à mesma barra de AT.

O SECTE prevê também a utilização de chaveamentos de linhas para casos específicos em períodos de carga mínima onde não são encontradas soluções através dos controles disponíveis, dando então um tratamento mais seguro para este tipo de prática.

O operador participa do processo em vários momentos, optando por uma verificação sobre todo o sistema transmissão/distribuição ou apenas sobre as barras de transmissão e limitando o número de controles que podem ser alterados em uma única consulta.

A base de conhecimento em PROLOG possui aproximadamente 60 regras com conclusões diferentes, ou 110 no total. Vários resultados fornecidos pelo SECTE, testados com sistemas reais e teóricos, em diferentes condições de carregamento, são apresentados no capítulo 6 e em alguns casos são comparados com soluções fornecidas por outros algoritmos.

5.4 - INTERFACE ENTRE O SISTEMA ESPECIALISTA E PROGRAMAS NUMÉRICOS

5.4.1 - .Introdução

Na maioria das aplicações em sistemas de potência, o uso do sistema baseado em conhecimento não elimina a utilização de ferramentas numéricas. Por exemplo, um processador de alarmes inteligente tem necessidade de conhecer a topologia da rede, mais facilmente obtida via algoritmos tradicionais [61].

O mesmo acontece no trabalho que vem sendo apresentado até aqui: os fatos necessários para a atuação do sistema especialista para controle de tensão são fornecidos por programas em FORTRAN, que precisam trocar informações com o sistema desenvolvido em PROLOG.

Este item tratará basicamente do trabalho desenvolvido durante o período de um ano na Universidade de Brunel. O principal objetivo a ser atingido neste período era o de continuar o desenvolvimento do sistema especialista SECTE e integrá-lo aos programas numéricos para cálculo de fluxo de potência e sensibilidades (SENSIB - desenvolvido pelo Grupo de Sistemas de Potência da UFSC) e simulação de chaveamentos em linhas de transmissão (SIMULA - desenvolvido na primeira etapa deste trabalho e descrito no capítulo 2), como mostrado na Figura 5.2.

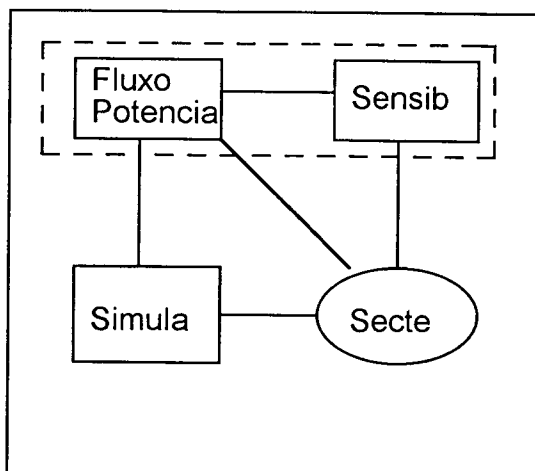


Figura 5.2 - Integração do Sistema Especialista com programas numéricos

A integração entre estes programas foi feita inicialmente da seguinte maneira:

- SECTE/SIMULA: A parte inicial do 'sensib', ou seja, o fluxo de potência, era executado em conjunto com o 'simula', para testes dos efeitos dos chaveamentos no perfil de tensões.
- SECTE/SENSIB: O programa 'sensib' era executado numa primeira etapa, criando dois arquivos, um continha os dados sobre barras e controladores resultantes do fluxo de potência, e o outro os dados sobre sensibilidades.

Na figura 5.3 pode ser observado o fluxograma do processo completo neste estágio. Além da chamada aos programas não ser automática, outros fatores levavam a perda de tempo de execução:

- uso de arquivos para passagem de dados,
- as sugestões de controle feitas pelo SECTE eram alteradas pelo operador no arquivo de dados do sistema que depois era relido pelo programa SENSIB na segunda chamada.

Na Universidade de Brunel as versões trazidas dos programas foram instaladas no ambiente POPLOG, escolhido para desenvolvimento da integração entre os mesmos. O equipamento utilizado foi uma estação DEC VAX 3100 (sistema operacional VMS) da rede

do BIPS (Brunel Institute of Power Systems)/CEC (Control Engineering Centre). O Sistema POPLOG é descrito no item 5.4.2 e no item 5.4.3 é descrito o sistema após a integração.

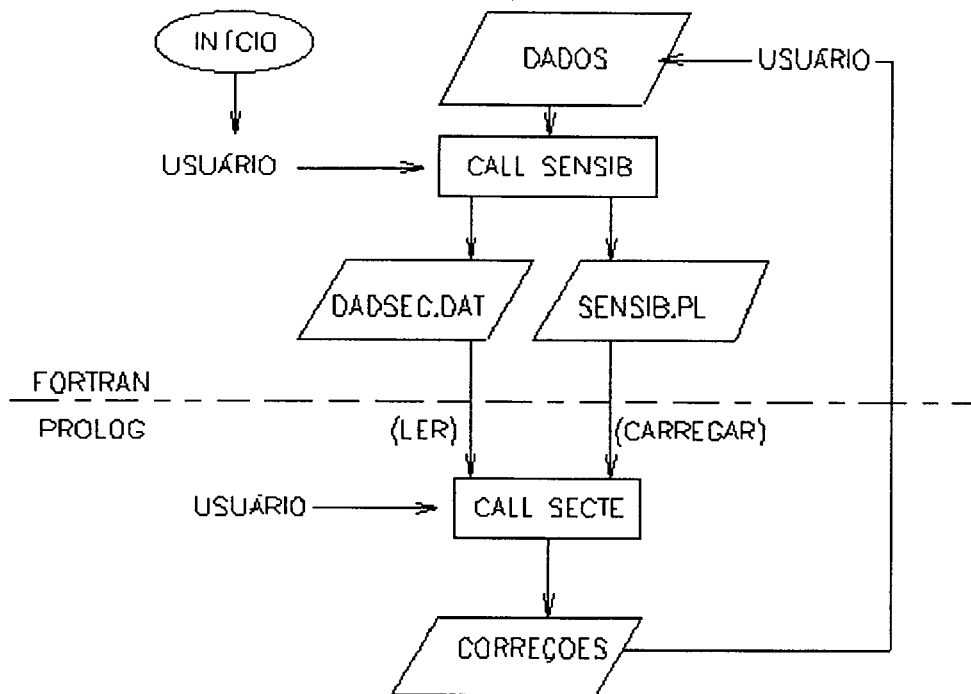


Figura 5.3 - Fluxograma do Sistema com interface via arquivos

5.4.2 - O Sistema POPLOG

O sistema POPLOG é um ambiente de programação para inteligência artificial desenvolvido pela Universidade de Sussex e roda em várias máquinas e sistemas operacionais. Um editor de texto, chamado VED (tipo EMACS), geralmente faz a interface entre o usuário e os compiladores. Este ambiente possui compiladores para POP-11, PROLOG, Common Lisp e ML. Todos estes compiladores geram um código a partir do mesmo conjunto de instruções de máquina virtual (MV). O código MV é traduzido para código de máquina. A vantagem

principal do uso de um MV é facilitar o compartilhamento de dados entre as linguagens. A escolha, entretanto, não é restrita às linguagens fornecidas pelo POPLOG porque módulos objeto criados externamente também podem se carregados. Desta forma o usuário pode escolher a linguagem apropriada a cada parte da aplicação.

A arquitetura do POPLOG permite total integração entre PROLOG, LISP, ML e POP-11 além da habilidade de linkar e chamar qualquer linguagem compilada externamente.

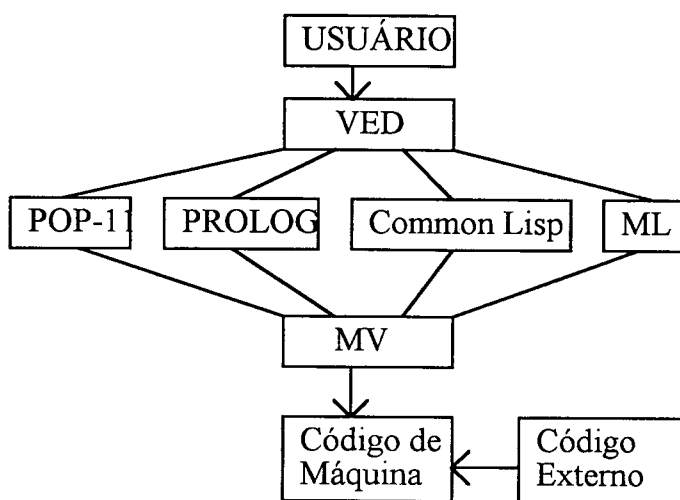


Figura 5.4 - A arquitetura do POPLOG

Uma das principais vantagens da utilização do POPLOG é a oportunidade de ter várias linguagens disponíveis, integradas no mesmo ambiente. A maior parte do POPLOG está implementada em POP-11, que pode então ser chamada da linguagem do sistema, e como os subsistemas do POPLOG são implementados em POP-11, este compilador está sempre presente quando qualquer outro é acessado.

A integração PROLOG/FORTRAN, não é possível diretamente, sendo necessário que se desenvolva todo o controle em POP-11 e este sim sirva de interface entre o PROLOG e o FORTRAN.

Integração POP-11/PROLOG

O POPLOG fornece mecanismos para possibilitar que programas escritos em POP-11 chamem procedimentos em PROLOG e vice-versa. Há três maneiras principais de chamar procedimentos em PROLOG a partir do POP-11:

No primeira, empregando-se 'prolog-invoke' e 'prolog-maketerm' invocam-se metas em POP11 e descobre-se o valor de variáveis em PROLOG. O segundo trabalha através do mecanismo de continuação, onde procedimentos em PROLOG são vistos como procedimentos em POP-11 com um argumento extra, e o terceiro cria processos em POP-11 que chamam procedimentos em PROLOG. Este último mecanismo de interação ainda é apenas parcialmente explorado.

O mecanismo escolhido foi o uso dos predicados 'prolog-invoke' e 'prolog-maketerm', associados à biblioteca 'languages', que uma vez carregada permite que a mudança entre os ambientes seja feita a partir de qualquer subsistema através dos comandos:

```
POP11
    que leva ao POP-11
TOP
    que leva ao PROLOG 'top level'

PROLOG
    que leva ao PROLOG reconsult.
```

Integração POP-11/FORTRAN

A maneira de chamar funções e subrotinas em FORTRAN ou PASCAL a partir do POPLOG ainda é um pouco 'desajeitada', quando comparada com a chamada de funções em C. A razão disto está ligada à maneira como os argumentos são passados nestas linguagens. A função *exload* é usada para carregar código compilado externamente e tem a seguinte sintaxe:

```
exload  
  <mark item>  
  <input files>  
  <identifier specs>  
endexload
```

Onde:

<mark item> é um item que identifica este -exload- em particular, usualmente um número ou uma palavra;

<input files> uma lista de arquivos objeto, incluído entre chaves;

<identifier specs> nome da rotina a ser carregada, seguida pelo número de argumentos em parênteses, seguida por vírgula e após pelo tipo de objeto retornado da subrotina.

O efeito da declaração 'exload' é criar uma variável global em POP-11 com o nome especificado, e colocar nela um objeto representando um ponteiro para rotina externa.

Através do comando 'exacc' pode-se chamar o procedimento externo.

A passagem de dados deve ser cuidadosa. A maioria das estruturas de dados existentes em POPLOG são representadas de maneira diferente das usadas pela maior parte das linguagens externas. Logo é freqüentemente necessário, quando se passa dados do POPLOG para código externo, que se efetue algum tipo de conversão para uma forma que possa ser manuseada convenientemente pelo código externo.

Um dos principais problemas de se chamar subrotinas e funções em FORTRAN é o fato que nesta linguagem variáveis (números) inteiras, reais, etc são passados por referência ao invés de por valor. Isto quer dizer que o que se espera é um ponteiro para o dado ao invés do dado propriamente. O que se deve passar no caso de um inteiro, por exemplo, não é o valor inteiro, mas um ponteiro para a posição de memória que contém este inteiro.

Por este motivo toda variável que vá ser argumento da função/subrotina em FORTRAN deve ser definida no POP-11 como um vetor, mesmo que de um elemento apenas.

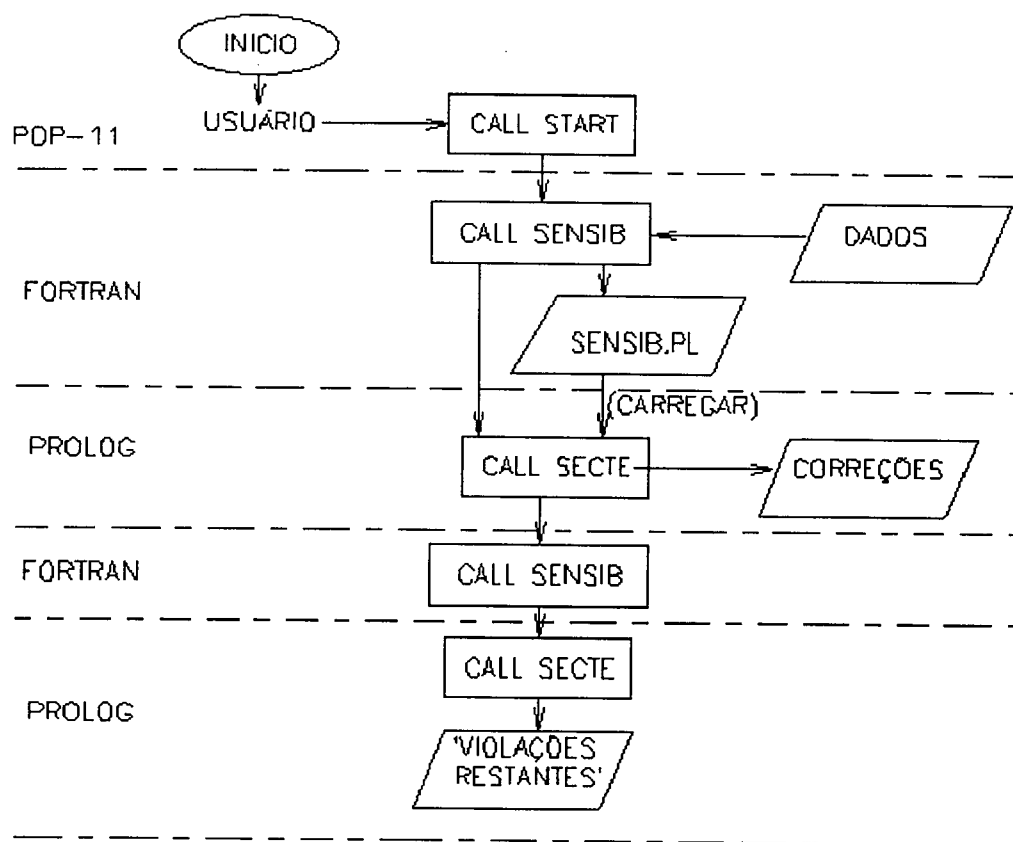
5.4.3 - Integração SECTE/SENSIB/SIMULA

Nesta etapa a intervenção do usuário, que acontecia 3 vezes na estrutura inicial mostrada na Figura 5.3, ficou reduzida a uma chamada pra iniciar o processo, como mostrado na Figura 5.5. Todo o controle do processo - chamada dos programas em FORTRAN e PROLOG, adaptação de formato dos dados que são trocados entre as duas linguagens, etc - passou a ser feito pelo POP-11.

Para possibilitar sua chamada a partir do POP-11, o programa SENSIB passou a ter formato de subrotina e a ocupar um único arquivo em FORTRAN, que também continha a subrotina SIMULA. Os argumentos desta subrotina incluindo todos os programas em FORTRAN são:

- 1 - O nome do arquivo de dados, por exemplo: sis39b1;
- 2 - O tamanho do nome do arquivo de dados, que neste exemplo seria 7;
- 3 - Um flag para indicar se é a primeira chamada, se é uma segunda chamada onde se deseja apenas o cálculo do fluxo de potência partindo dos primeiros resultados mas alterando os controles passados no quarto argumento, ou se é também uma segunda chamada onde se deseja simular um chaveamento considerando os resultados finais do fluxo executado na primeira chamada;
- 4 - Vetor de alterações nos controles de tensão (posição de tap ou tensão de geração), este vetor não tem utilização na primeira chamada, mas na segunda indica quais controles devem ser modificados, de acordo com sugestões do SECTE;
- 5 - Dimensão do vetor do item 4;

Figura 5.5 - Fluxograma do Sistema Instalado no Ambiente POPLOG



6 - Dados de barras, que inicialmente eram enviados via arquivo 'dadsec.dat' (rever Figura 5.3), são agora colocados neste vetor, transferidos no POP-11 para uma lista e assim enviados ao PROLOG, que separa os dados nos atributos dos objetos barra, no formato:

barra(Nome,Tensão,Tensão_maxima,Tensao_minima).

Os valores de tensão máxima e mínima são definidos internamente no SECTE, de acordo com o período de carga;

7 - Dados dos controladores, que são enviados de maneira similar entre o FORTRAN-POP-11-PROLOG e formam no 'SECTE' os objetos:

control(Indice,Classe,Estado,Ajuste,Lim_superior,Lim_inferior,Passos,Local,Extremo);

8 - Numero total de barras de carga;

9 - Número total de controladores (barras de geração mais transformadores);

Os dados sobre sensibilidades controles x barras de carga continuaram a ser enviados via arquivo, embora também pudessem ter sido transformados em argumentos. O opção por mantê-los em arquivo veio do fato deste arquivo receber tratamento de programa pelo PROLOG (extensão 'pl') e só ser carregado quando necessário, ou seja, quando violações de tensão são detectadas.

O procedimento 'start', ou melhor, 'start('datafile')', do POP-11, conduz às seguintes etapas:

1 - Chama o programa 'sensib'(FORTRAN) pela primeira vez, para:

- Ler dados do sistema indicado, por exemplo, 'sis39b1.dat';

- Calcular fluxo de carga, colocando dados finais de controladores e barras de carga nos vetores apropriados;

- Calcular sensibilidades, imprimindo resultados no arquivo 'sensib.pl'.

2 - Os dados de barras e controladores são passados do formato de vetor enviado pelo programa em FORTRAN para o formato de listas, a fim de serem enviados para o programa em PROLOG;

3 - Chama o sistema 'SECTE' (PROLOG) para analisar estado do sistema e sugerir controles caso os mesmos sejam necessários. Os controles sugeridos são passados do PROLOG para o POP-11 no formato de uma lista, sendo os elementos:

Change = {controle1, alteração no controle 1, controle 2, ...}

O número limite de controles que podem ter seus valores alterados pelo 'SECTE' é fornecido pelo usuário, quando solicitado. Neste etapa o SECTE:

- verifica atual período de carga,
- lê dados de barras e controladores,
- verifica para as barras definidas na lista de interesse, que podem ser todas ou só as barras de alta tensão, se há violações nos limites de tensão,
- se não houver violações o processo falha e é interrompido,
- se há violações o arquivo com os dados das sensibilidades 'sensib.pl' é carregado e controles são selecionados.

4 - No POP11 a lista dos controles e suas correções é transferida para o formato de vetor a fim de posteriormente ser passado ao programa em FORTRAN;

$\{\text{controle1}, 0.010, \text{controle2}, 0.005\} \rightarrow [\text{controle1} \ 0.010 \ \text{controle2} \ 0.05]^T$

5 - Segunda chamada ao programa 'sensib', que desta vez parte do estado obtido ao final da primeira chamada, mas incluindo as alterações enviadas pelo vetor 'change'. Desta vez apenas o fluxo de potência é calculado e apenas os dados de barras atualizados são retornados;

6 - Segunda chamada ao 'SECTE', que apenas faz nova análise dos valores atuais de tensão em relação aos permitidos e apresenta os resultados ao operador.

Os estágios 4 e 5 formam a etapa de verificação, a qual confirma ao operador a vantagem de se aplicar ou não os controles sugeridos no item 3.

5.5 - CONCLUSÕES

Há na literatura vários trabalhos sobre sistemas especialistas aplicados a controle de tensão com vários pontos em comum, como a utilização de sensibilidades entre controles e barras de carga mas também com características bastante diferentes.

Um problema comumente discutido é a integração entre o sistema especialista e ferramentas numéricas normalmente disponíveis em um centro de operações. No início do desenvolvimento deste trabalho este problema de interface foi parcialmente solucionado com a utilização de arquivos para transferência de dados. Este processo era limitado e obrigava a participação do usuário no controle da chamada aos programas.

O processo automatizado, utilizando o ambiente POPLOG, tornou-se mais simples para o usuário, que não necessita mais intervir várias vezes e nem alterar arquivos de dados antes da segunda chamada ao fluxo de potência.

Somente a eliminação do arquivo 'dadsec.dat' trouxe uma economia da ordem de 20% no tempo de CPU. O fato da segunda chamada ao fluxo de potência partir dos resultados finais da primeira chamada também traz economia quando o número de controles alterados é pequeno.

A integração PROLOG-FORTRAN no sistema POPLOG é na verdade uma integração PROLOG-POP11-FORTRAN. O início do processo, a chamada aos programas e a transferência de dados são controlados através do POP11.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados alguns detalhes da implementação e resultados dos programas para simulação de chaveamentos, do sistema baseado no conhecimento e do sistema completo. Os testes foram aplicados a dois sistemas, sendo um da literatura e um sistema real, reduzido do sistema sul-sudeste brasileiro e utilizado no simulador de sistemas de potência, em fase desenvolvimento no Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC.

Alguns resultados do sistema integrado foram obtidos na versão que utiliza o POPLOG e outros na versão que faz a integração via arquivos. Detalhes destas duas versões foram apresentados no capítulo 5.

No item 6.2 o programa de simulação de chaveamentos é analisado isoladamente, no item 6.3 são mostrados alguns resultados do sistema especialista SECTE, sendo que as sugestões fornecidas pelo SECTE são comparadas com as sugestões do programa de otimização da referência [100], que busca minimizar o quadrado da soma das violações de tensão e considera restrições de desigualdade. As dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste sistema, as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos são apresentadas nos itens 6.4, 6.5 e 6.6, respectivamente.

6.2 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CHAVEAMENTOS

Nestes testes o programa de simulação de chaveamentos é executado logo após a convergência do fluxo de potência com o sistema completo.

Os primeiros testes foram feitos no sistema IEEE 39 barras, cujos dados são apresentados no apêndice B. Foram simulados os chaveamentos das linhas 2, 9 e 44. Os resultados destas simulações são mostrados nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, respectivamente.

O método é não iterativo, ou seja, estes resultados foram obtidos em apenas 1 iteração. Nas tabelas 6.1 a 6.3 são apresentadas, além das colunas de indicação do número e tipo de cada barra, as seguintes colunas:

- estado inicial: dados relativos ao sistema completo.
- simulação simplificada: resultados obtidos da simulação dos chaveamentos através de injeções de compensação (potências ativa e reativa).
- simulação completa: resultados obtidos a partir da correção por diacóptica dos resultados da simulação simplificada.
- sem LT: resultados obtidos a partir da execução de um fluxo de potência completo, sem a linha em questão.

Os resultados obtidos mostram que o erro da simulação simplificada é maior quanto maior a variação do estado na barra causada pelo desligamento da linha, ou seja, quando a tensão e/ou ângulo na barra variam pouco o erro é pequeno, mas em muitos casos a variação é considerável e o erro se torna inaceitável. Por este motivo o método simplificado foi abandonado.

Como era de se esperar, as maiores variações no módulo (barras PQ) e ângulo (barras PQ e PV) das barras ocorre nas barras terminais dos elementos chaveados e em sua primeira vizinhança. Para cada um dos testes foram feitas três medições de tempo transcorrido nas estações SUN SPARC2 - 40 MHz, e os resultados médios são apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.1 - Retirada LT 2 (entre barras 1 e 39)

Barra	Tipo	Estado inicial.		Simul. simpl.		Simul. compl.		Sem LT	
		V	δ	V	δ	V	δ	V	δ
1	PQ	0.968	-10.21	0.974	-9.35	0.993	-4.17	0.990	-4.317
2	PQ	0.973	-7.05	0.974	-6.64	0.977	-4.19	0.976	-4.24
3	PQ	0.948	-10.64	0.949	-10.36	0.949	-8.71	0.948	-8.76
4	PQ	0.929	-11.91	0.929	-11.81	0.929	-11.19	0.928	-11.24
5	PQ	0.939	-10.64	0.939	-10.64	0.938	-10.62	0.937	-10.67
6	PQ	0.943	-9.86	0.943	-9.87	0.942	-9.87	0.941	-9.92
7	PQ	0.929	-12.35	0.929	-12.40	0.929	-12.70	0.927	-12.75
8	PQ	0.927	-12.92	0.927	-12.99	0.926	-13.43	0.925	-13.49
9	PQ	0.952	-12.49	0.952	-13.00	0.951	-15.98	0.950	-16.07
10	PQ	0.955	-7.37	0.955	-7.32	0.955	-7.05	0.954	-7.09
11	PQ	0.950	-8.22	0.950	-8.19	0.950	-8.00	0.949	-8.05
12	PQ	0.928	-8.23	0.928	-8.19	0.927	-7.91	0.927	-7.95
13	PQ	0.947	-8.09	0.947	-8.03	0.947	-7.67	0.946	-7.71
14	PQ	0.936	-9.81	0.936	-9.71	0.936	-9.12	0.935	-9.16
15	PQ	0.921	-10.05	0.921	-9.87	0.921	-8.78	0.920	-8.84
16	PQ	0.931	-8.21	0.931	-8.00	0.931	-6.70	0.931	-6.76
17	PQ	0.938	-9.36	0.938	-9.11	0.939	-7.62	0.938	-7.68
18	PQ	0.940	-10.37	0.941	-10.11	0.941	-8.55	0.940	-8.61
19	PQ	0.977	-2.85	0.977	-2.64	0.977	-1.34	0.977	-1.39
20	PQ	0.923	-4.19	0.924	-3.98	0.924	-2.68	0.923	-2.73
21	PQ	0.924	-5.25	0.924	-5.04	0.924	-3.75	0.924	-3.80
22	PQ	0.939	0.28	0.939	0.49	0.939	1.78	0.939	1.73
23	PQ	0.930	0.33	0.931	0.54	0.931	1.83	0.930	1.78
24	PQ	0.924	-8.01	0.924	-7.80	0.925	-6.50	0.924	-6.55
25	PQ	0.976	-5.28	0.977	-4.89	0.978	-2.53	0.977	-2.59
26	PQ	0.960	-6.93	0.960	-6.61	0.960	-4.67	0.959	-4.73
27	PQ	0.943	-9.44	0.943	-9.15	0.943	-7.41	0.942	-7.47
28	PQ	0.958	-2.73	0.958	-2.41	0.958	-0.48	0.958	-0.54
29	PQ	0.960	0.56	0.960	0.88	0.960	2.81	0.960	2.76
30	PV	1.000	-3.78	1.000	-3.38	1.000	-0.94	1.000	-0.99
31	FOLGA	0.950	0.00	0.950	0.00	0.950	0.00	0.950	0.00
32	PV	0.950	0.77	0.950	0.82	0.950	1.09	0.950	1.06
33	PV	0.950	2.67	0.950	2.89	0.950	4.18	0.950	4.13
34	PV	0.950	2.12	0.950	2.34	0.950	3.63	0.950	3.58
35	PV	0.950	5.91	0.950	6.12	0.950	7.41	0.950	7.36
36	PV	0.950	11.11	0.950	11.32	0.950	12.61	0.950	12.57
37	PV	0.950	2.64	0.950	3.03	0.950	5.38	0.950	5.33
38	PV	0.950	8.85	0.950	9.17	0.950	11.10	0.950	11.05
39	PV	0.950	12.14	0.950	-12.94	0.950	-17.62	0.950	-17.72

Tabela 6.2 - Retirada LT 9 (entre barras 4 e 14)

Barra	Tipo	Estado inicial.		Simul. simpl.		Simul. compl.		Sem LT	
		V	δ	V	δ	V	δ	V	δ
1	PQ	0.968	-10.21	0.967	-10.34	0.967	-10.51	0.967	-10.58
2	PQ	0.973	-7.05	0.972	-7.17	0.971	-7.36	0.970	-7.43
3	PQ	0.948	-10.64	0.946	-10.82	0.944	-11.13	0.943	-11.20
4	PQ	0.929	-11.91	0.925	-12.48	0.920	-13.59	0.918	-13.69
5	PQ	0.939	-10.64	0.936	-10.76	0.934	-10.95	0.932	-11.00
6	PQ	0.943	-9.86	0.941	-9.90	0.939	-9.92	0.938	-9.97
7	PQ	0.929	-12.35	0.927	-12.43	0.925	-12.53	0.924	-12.58
8	PQ	0.927	-12.92	0.925	-13.02	0.923	-13.14	0.922	-13.21
9	PQ	0.952	-12.49	0.951	-12.60	0.950	-12.75	0.950	-12.82
10	PQ	0.955	-7.37	0.954	-6.99	0.956	-6.17	0.955	-6.20
11	PQ	0.950	-8.22	0.949	-7.97	0.949	-7.42	0.948	-7.45
12	PQ	0.928	-8.23	0.927	-7.85	0.929	-7.03	0.927	-7.06
13	PQ	0.947	-8.09	0.947	-7.58	0.951	-6.49	0.949	-6.52
14	PQ	0.936	-9.81	0.937	-8.96	0.944	-7.14	0.942	-7.18
15	PQ	0.921	-10.05	0.921	-9.59	0.924	-8.58	0.923	-8.63
16	PQ	0.931	-8.21	0.930	-7.93	0.932	-7.27	0.931	-7.32
17	PQ	0.938	-9.36	0.937	-9.24	0.937	-8.92	0.936	-8.97
18	PQ	0.940	-10.37	0.939	-10.36	0.938	-10.28	0.937	-10.35
19	PQ	0.977	-2.85	0.977	-2.56	0.977	-1.92	0.977	-1.96
20	PQ	0.923	-4.19	0.923	-3.91	0.924	-3.26	0.924	-3.30
21	PQ	0.924	-5.25	0.924	-4.97	0.925	-4.32	0.924	-4.37
22	PQ	0.939	0.28	0.939	0.56	0.939	1.20	0.939	1.16
23	PQ	0.930	0.33	0.930	0.61	0.931	1.26	0.930	1.21
24	PQ	0.924	-8.01	0.924	-7.73	0.925	-7.07	0.924	-7.12
25	PQ	0.976	-5.28	0.976	-5.38	0.976	-5.52	0.975	-5.58
26	PQ	0.960	-6.93	0.959	-6.92	0.959	-6.83	0.959	-6.89
27	PQ	0.943	-9.44	0.942	-9.38	0.942	-9.18	0.941	-9.24
28	PQ	0.958	-2.73	0.958	-2.72	0.958	-2.63	0.957	-2.69
29	PQ	0.960	0.56	0.960	0.57	0.960	0.66	0.959	0.60
30	PV	1.000	-3.78	1.000	-3.90	1.000	-4.09	1.000	-4.15
31	FOLGA	0.950	0.00	0.950	0.00	0.950	0.00	0.950	0.00
32	PV	0.950	0.77	0.950	1.15	0.950	1.96	0.950	1.94
33	PV	0.950	2.67	0.950	2.96	0.950	3.61	0.950	3.56
34	PV	0.950	2.12	0.950	2.40	0.950	3.05	0.950	3.01
35	PV	0.950	5.91	0.950	6.19	0.950	6.83	0.950	6.79
36	PV	0.950	11.11	0.950	11.39	0.950	12.03	0.950	11.99
37	PV	0.950	2.64	0.950	2.54	0.950	2.41	0.950	2.35
38	PV	0.950	8.85	0.950	8.86	0.950	8.95	0.950	8.90
39	PV	0.950	-12.14	0.950	-12.26	0.950	-12.42	0.950	-12.49

Tabela 6.3 - Retirada LT 44 (entre barras 26 e 29)

Barra	Tipo	Estado inicial.		Simul. simpl.		Simul. compl.		Sem LT	
		V	δ	V	δ	V	δ	V	δ
1	PQ	0.968	-10.21	0.967	-10.30	0.967	-10.30	0.966	-10.39
2	PQ	0.973	-7.05	0.970	-7.13	0.970	-7.13	0.970	-7.22
3	PQ	0.948	-10.64	0.945	-10.73	0.945	-10.73	0.944	-10.82
4	PQ	0.929	-11.91	0.927	-12.00	0.927	-11.99	0.927	-12.06
5	PQ	0.939	-10.64	0.937	-10.71	0.937	-10.70	0.937	-10.76
6	PQ	0.943	-9.86	0.942	-9.93	0.942	-9.93	0.942	-9.98
7	PQ	0.929	-12.35	0.928	-12.43	0.928	-12.42	0.928	-12.48
8	PQ	0.927	-12.92	0.926	-12.99	0.926	-12.99	0.926	-13.05
9	PQ	0.952	-12.49	0.951	-12.58	0.952	-12.58	0.951	-12.65
10	PQ	0.955	-7.37	0.954	-7.43	0.954	-7.43	0.953	-7.49
11	PQ	0.950	-8.22	0.949	-8.28	0.949	-8.28	0.949	-8.34
12	PQ	0.928	-8.23	0.926	-8.30	0.926	-8.29	0.926	-8.35
13	PQ	0.947	-8.09	0.946	-8.16	0.946	-8.16	0.946	-8.22
14	PQ	0.936	-9.81	0.934	-9.89	0.934	-9.89	0.934	-9.96
15	PQ	0.921	-10.05	0.918	-10.14	0.918	-10.13	0.918	-10.21
16	PQ	0.931	-8.21	0.928	-8.29	0.928	-8.29	0.927	-8.37
17	PQ	0.938	-9.36	0.933	-9.45	0.933	-9.45	0.932	-9.53
18	PQ	0.940	-10.37	0.936	-10.46	0.936	-10.46	0.935	-10.55
19	PQ	0.977	-2.85	0.976	-2.92	0.976	-2.92	0.976	-3.00
20	PQ	0.923	-4.19	0.923	-4.26	0.923	-4.26	0.923	-4.34
21	PQ	0.924	-5.25	0.922	-5.32	0.922	-5.32	0.922	-5.40
22	PQ	0.939	0.28	0.938	0.22	0.938	0.22	0.938	0.15
23	PQ	0.930	0.33	0.929	0.27	0.929	0.28	0.929	0.20
24	PQ	0.924	-8.01	0.922	-8.09	0.922	-8.09	0.921	-8.17
25	PQ	0.976	-5.28	0.972	-5.30	0.972	-5.30	0.971	-5.38
26	PQ	0.960	-6.93	0.946	-6.94	0.946	-6.94	0.942	-7.03
27	PQ	0.943	-9.44	0.933	-9.52	0.933	-9.51	0.931	-9.62
28	PQ	0.958	-2.73	0.944	0.19	0.942	3.00	0.937	3.18
29	PQ	0.960	0.56	0.948	4.47	0.948	8.17	0.945	8.44
30	PV	1.000	-3.78	1.000	-3.86	1.000	-3.86	1.000	-3.94
31	FOLGA	0.950	0.00	0.950	0.00	0.950	0.00	0.950	0.00
32	PV	0.950	0.77	0.950	0.72	0.950	0.72	0.950	0.66
33	PV	0.950	2.67	0.950	2.61	0.950	2.61	0.950	2.53
34	PV	0.950	2.12	0.950	2.05	0.950	2.05	0.950	1.97
35	PV	0.950	5.91	0.950	5.86	0.950	5.86	0.950	5.79
36	PV	0.950	11.11	0.950	11.07	0.950	11.07	0.950	10.99
37	PV	0.950	2.64	0.950	2.65	0.950	2.65	0.950	2.58
38	PV	0.950	8.85	0.950	12.83	0.950	16.53	0.950	16.82
39	PV	0.950	-12.14	0.950	-12.23	0.950	-12.23	0.950	-12.30

Na Tabela 6.4 observa-se que o tempo dispendido para simular o chaveamento é da ordem de 5 a 10% do tempo que seria dispendido para redefinir a estrutura, calcular a matriz Jacobiana e executar novamente o fluxo de potência após modificação na topologia da rede.

Tabela 6.4 - Consumo Médio de Tempo Computacional nos testes com sistema 39 barras

Tarefa	Exemplo1	Exemplo2	Exemplo3
Leitura/Impressão dos Dados	0.197 s	0.178 s	0.181 s
Formação Estrutura do Jacobiano	0.072 s	0.160 s	0.113 s
Iterações do Fluxo Potência	0.318 s	0.334 s	0.432 s
Simulação	0.018 s	0.056 s	0.041 s

Os testes apresentados nas tabelas 6.5 a 6.8 foram efetuados utilizando como sistema de testes o sistema do simulador CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina), de 176 barras, em um horário de carga baixa (1:00h da madrugada), cujos dados são apresentados no apêndice B. Apenas os valores das tensões nas barras das extremidades dos elementos chaveados e suas primeiras vizinhanças são apresentados por serem os mais relevantes e por limitação de espaço.

Tabela 6.5 - Simulação Retirada LT 164-166

Barra		Sistema Completo		Sistema Simulado		Sem a LT	
Índice	Nome	V	δ	V	δ	V	δ
144	JOI 138kV	1.000	5.34	1.001	5.36	1.001	5.36
163	SMA 230kV	1.036	6.34	1.033	6.35	1.033	6.35
164	CBA 230kV	1.047	6.07	1.042	6.09	1.042	6.09
166	JOI 230kV	1.069	5.94	1.070	5.95	1.070	5.95
168	BLU 230kV	1.071	6.60	1.070	6.63	1.070	6.63
177	CBA 525kV	1.107	6.36	1.103	6.38	1.103	6.38

Tabela 6.6 - Simulação Retirada LT 175-176

Barra Índice	Nome	Sistema Completo		Sistema Simulado		Sem a LT	
		V	δ	V	δ	V	δ
171	ARE 525kV	1.061	7.11	1.055	7.14	1.055	7.13
173	SSA 525kV	1.018	8.23	1.010	8.39	1.010	8.40
174	GRA 525kV	1.099	3.92	1.076	3.92	1.075	3.92
175	CNO 525kV	1.091	5.96	1.078	5.78	1.078	5.77
176	ITA 525kV	1.081	6.22	1.045	6.68	1.043	6.70

Tabela 6.7 - Simulação Retirada Transformador 164-177

Barra Índice	Nome	Sistema Completo		Sistema Simulado		Sem o TF	
		V	δ	V	δ	V	δ
163	SMA 230kV	1.036	6.34	1.036	6.20	1.036	6.20
164	CBA 230kV	1.047	6.07	1.047	5.83	1.047	5.83
166	JOI 230kV	1.069	5.94	1.069	5.82	1.069	5.82
171	ARE 525kV	1.061	7.11	1.061	7.11	1.061	7.11
177	CBA 525kV	1.107	6.36	1.106	6.37	1.106	6.37
178	BLU 525kV	1.130	6.46	1.130	6.44	1.130	6.44

Tabela 6.8 - Simulação Retirada Shunt Barra 2

Barra Índice	Nome	Sistema Completo		Sistema Simulado		Sem o Shunt	
		V	δ	V	δ	V	δ
1	CAM 24kV	1.004	3.36	0.995	3.60	0.995	3.60
2	CAM 13.8kV	0.993	3.51	0.976	3.76	0.976	3.75
49	CAM 69kV	0.990	4.01	0.981	4.27	0.981	4.26
52	ITJS 69kV	0.995	4.57	0.993	4.62	0.993	4.61

Tabela 6.9 - Consumo Médio de Tempo Computacional nos testes com sistema 177 barras

Tarefa	Exemplo1	Exemplo2	Exemplo3	Exemplo4
Leitura/Impressão dos Dados	0.872 s	0.869 s	0.900	0.879 s
Formação Estrutura do Jacobiano	1.289 s	1.396 s	1.296	1.283 s
Iterações do Fluxo Potência	0.917 s	0.888 s	0.862	0.870 s
Simulação	0.066 s	0.064 s	0.059	0.011 s

6.3 - RESULTADOS DO SECTE

6.3.1 - Introdução

O programa SECTE, no seu estado atual, cumpre as seguintes tarefas:

- Verifica horário/data atual.
- Classifica período de carga.
- Lê dados de barras.
- Lê dados dos controladores.
- Forma a lista das barras com problema, em ordem decrescente da severidade da violação. Se não houver nenhuma barra com problema de tensão, pára. Um índice geral de severidade do estado do sistema é definido a partir do valor da maior violação e número máximo de violações existentes, para posteriormente (Tarefa 1 do algoritmo apresentado na página 66) verificar se o SECTE é capaz de lidar com este caso.
- Pergunta ao operador se deseja corrigir alguma barra em especial.
- Seleciona o controlador com maior sensibilidade em relação à primeira barra da lista de barras com problemas ou a barra selecionada pelo operador. Verifica se este controle está disponível e se pode excursionar no sentido de interesse. Se não estiver, busca o próximo.
- Calcula a variação necessária no controlador para resolver o problema da barra em questão. Se esta variação extrapolar limite do controlador, levar o mesmo até o seu limite. Se o controle for através da variação de taps, ajusta a mesma para um número inteiro de passos. Nesta etapa também verifica se há transformadores em paralelo com o selecionado ou, se o controle for tensão de geração, verifica se há outras barras na mesma usina; nestes casos a alteração é dividida igualmente entre os transformadores ou geradores.
- Verifica o efeito deste controle nas demais barras de carga com sensibilidade em relação ao controle selecionado acima de 5% (valor arbitrado). Se este controle piorar alguma violação existente ou criar novas o sistema retrocede e procura um novo controle.
- Apresenta ao operador a sugestão de controle e a provável lista de violações após execução deste controle.
- Este procedimento é repetido até que a lista das barras com problema fique vazia.

Serão apresentados a seguir cinco exemplos de atuação do SECTE. Os dois primeiros baseiam-se no sistema NEW ENGLAND de 39 barras e os demais no sistema empregado no simulador que se encontra em fase final de desenvolvimento no Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC, e que deverá ser utilizado para estudos e treinamento nas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) [21].

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram duas telas deste simulador. Na primeira é mostrado um mapa de Santa Catarina dividido em várias regiões. Na segunda é mostrado o diagrama unifilar com os carregamentos das linhas na região do Vale do Itajaí, e que aparece quando esta região é selecionada através de um clique com o “mouse” na primeira tela.

O usuário define inicialmente o número máximo de controles que podem ser selecionados pelo SECTE. Quando este número é atingido o processo pára. Pode também parar com número menor de controles, se não houver mais violações a serem corrigidas ou não for possível selecionar novos controles. O SECTE busca sempre controles para a barra com a maior violação. Se não for possível encontrar controles para esta barra tenta a segunda maior violação e assim sucessivamente. O operador tem a possibilidade de alterar este procedimento solicitando ao SECTE que corrija uma determinada barra da lista barras com sub ou sobretensões.

6.3.2 - Caso 1 - Sistema New England 39 Barras

Os dados iniciais do estado do sistema neste caso são os que constam do Apêndice B. Todos os limites de tensão em barras de geração e de carga são definidos como 0,95 e 1.05; todos os taps transformadores são considerados comutáveis sob carga e variam entre 0,90 e 1,10.

Em uma primeira consulta ao SECTE são fornecidas as seguintes informações:

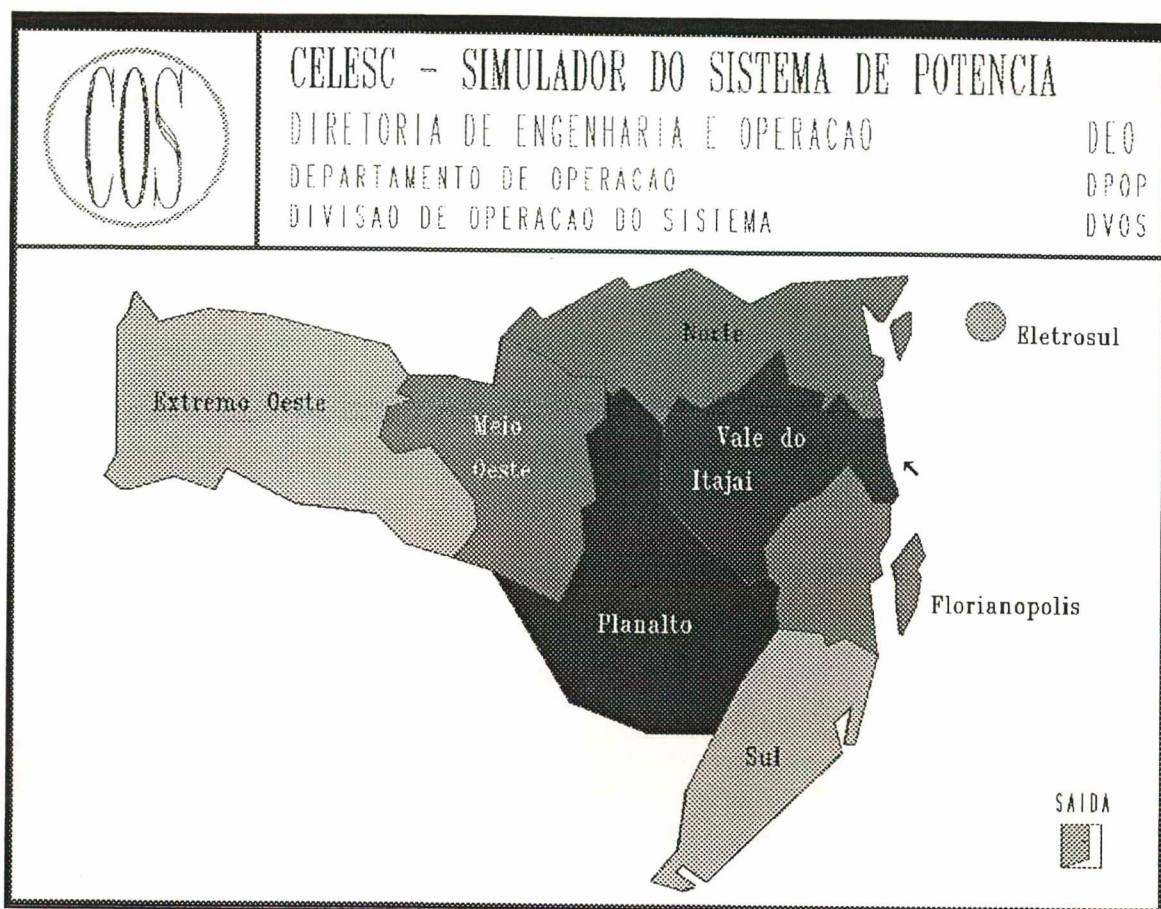


Figura 6.1 - Tela principal do Simulador

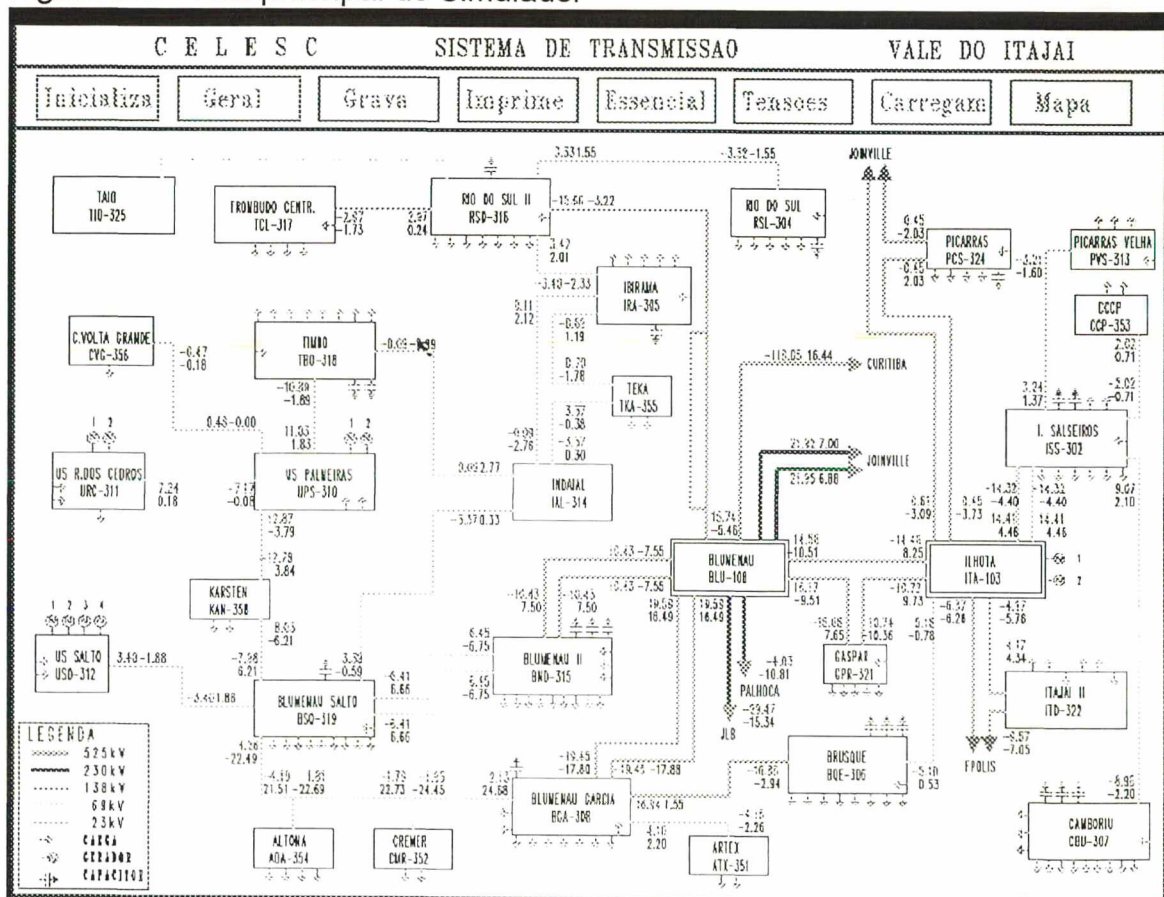


Figura 6.2 - Unifilar da Região do Vale do Itajaí

- Período de carga = 2 (carga média).
- Lista das Barras com violações = [15,20,21,24,8,12,4,7,16,23,14,17,5,22,18,6,27,13,3].
- Há 19 violações.
- Qual o número máximo de controles que podem ser alterados? (total =22)
|: 5.
- Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)
|: n.
- Controle de maior influência na barra 15 é o número 6 (tensão na barra 35), que tem sensibilidade igual a 0.215.
- Variação necessária neste controle = 0.100.
- Agora a lista das barras com problema = [20,8,7,12, 4,15,5,14,6].
- Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)
|: n.
- Controle de maior influência na barra 20 é o de número 5 (tensão na barra 34), que tem sensibilidade igual a 0.604.
- Variação necessária neste controle = 0.036.
- Agora a lista das barras com problema = [8,7,12,4,5,15,14,6].
- Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)
|: n.
- Controle de maior influência na barra 8 é o de número 2 (tensão na barra 31), que tem sensibilidade igual a 0.368.
- Variação necessária neste controle = 0.046.
- Agora a lista das barras com problema = [12].
- Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)
|: n.
- Controle de maior influência na barra 12 é o de número 14 (tap barra 11), que tem sensibilidade igual a -0.488.
- Variação necessária neste controle = -0.005.
- Agora a lista das barras com problema = [].

Após nova execução do fluxo de potência e do SECTE, incluindo estas alterações ($\Delta V_{35}=0.100$, $\Delta V_{34}=0.036$, $\Delta V_{31}=0.043$, $\Delta tap_{11}=-0.005$) são fornecidos os seguintes resultados:

- Lista das barras com problema = []

O que significa que não são constatadas violações.

Este caso apresentava inicialmente 19 barras com problemas de subtensão e foi solucionado com o ajuste de apenas 4 controles em um única consulta. O programa de otimização [100] com a opção de selecionar um controle por violação (para limitar o número de controles alterados) solucionou este caso em duas iterações, no entanto alterou 6 tensões de geração e 1 posição de tap.

6.3.3 - Caso 2 - Sistema New England 39 Barras

Neste caso foram provocados problemas de sobretensão através da elevação das tensões de geração para:

$V_{30}=V_{35}=V_{38}=1.03$; $V_{31}=1.02$; $V_{32}=V_{33}=V_{36}=1.04$; $V_{34}=V_{37}=1.05$; $V_{39}=1.01$.

Neste caso o SECTE apresentou os seguintes resultados:

- Lista das barras com problema = [19, 25, 26].

- Há 3 violações.

- Qual o número máximo de controles que podem ser alterados?

|: 5.

- Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

- Controle de maior influência na barra 19 é o de número 4 (tensão na barra 33), que tem sensibilidade igual a 0.538.

- Variação necessária neste controle = -0.0052.

- Agora a lista das barras com problema = [25].

- Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

- Controle de maior influência na barra 25 é o número 8 (tensão na barra 37), que tem sensibilidade igual a 0.401.

- Variação necessária neste controle = -0.020.

- Agora a lista de barras com problema = [].

Após execução de um fluxo de potência incluindo estas alterações ($\Delta V_{33}=-0.052$, $\Delta V_{37}=-0.02$) foi feita uma segunda consulta ao SECTE, que apresentou a seguinte resposta:

- lista das barras com problema = [].

Ou seja, não são constatadas violações. Logo, de maneira similar ao acontecido no primeiro caso, apenas uma consulta ao SECTE - alterando de duas tensões de geração - foi necessária para sanar completamente as violações. Neste caso o programa de otimização, com a opção de seleção de um controle por violação, também corrigiu as violações em uma iteração, alterando 3 tensões de geração.

6.3.4 - Caso 3 - Sistema Sul-Sudeste 176 Barras (Simulador)

Os dados físicos do sistema utilizado neste caso são apresentados no Apêndice B. Este sistema de dados é utilizado no simulador para o horário das 20:00h. Os limites nas considerados para as barras de carga e de geração foram 0.95 e 1.05 pu, sendo que no caso das barras de geração os limites de reativos são verificados na etapa do fluxo de potência. Os limites nas posições de taps dos transformadores com comutação sob carga são definidos nos arquivos de dados. Após a execução de um fluxo de potência pode-se observar problemas de sub e sobretensão, apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Violações iniciais no sistema

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
153	1.099	11	1.067	97	1.059	15	1.057
152	1.091	142	1.063	98	1.059	140	1.057
139	1.080	151	1.062	17	0.942	141	1.055

Resultados do SECTE - Primeira Consulta:

Período de Carga = 2 (média)

Lista das Barras com violações=[153,152,139,11,142,151,97,98,17,15,140, 141]

Há 12 violações.

Qual o número máximo de controles que podem ser alterados?

|: 5.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

O controle de maior influência na barra 153 é o número 15, que tem sensibilidade igual a 0.239.

Alteração no controle 15 (vger - barra 95) é de -0.038.

[153,152,139,11,142,98,97,17,140,15,141,151].

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

O controle de maior influência na barra 153 é o número 16, que tem sensibilidade igual a 0.236.

Alteração no controle 16 (vger - barra 96) é de -0.02.

[153,139,152,11,142,97,98,17,15,140,141]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

O controle com maior influência na barra 153 é o número 30, que tem sensibilidade igual a 0.083.

Alteração no controle 30 (vger - barra 168) é -0.02.

[153,152,139,11,17,142].

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

(Como o Secte não encontra controles para corrigir a primeira barra da lista, volta a perguntar ao usuário se ele deseja selecionar uma outra. Se o usuário responder que não, será selecionada a segunda barra da lista, e assim sucessivamente)

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: y.

Qual barra da lista de barras com violações?

|: 139.

O controle de maior influência na barra 139 é o 151, que tem sensibilidade igual a 0.155.

Alteração no controle 151 (tap- barras 142/164) é de -0.035.

Alteração no controle 150 (tap- barras 142/164) é de -0.035.

Alteração no controle 149 (tap- barras 142/164) é de -0.035.

Alteração no controle 148 (tap- barras 142/164) é de -0.035.

[153,152,17]

Por já ter selecionado 6 controles o sistema para. Após executar um fluxo de potência incluindo estas primeiras sugestões fornecidas pelo SECTE, uma nova consulta é feita:

Resultados do SECTE - segunda consulta

Período de Carga = 2 (média)

Lista das Barras com violações=[153,152,17]

Há 3 violações.

Qual o número máximo de controles que podem ser alterados?

|: 5.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: y.

Qual barra da lista de barras com violações?

|: 17.

O controle com maior influência na barra 17 é o número 1, que tem sensibilidade igual a 0.901.

Alteração no controle 1 (vger - barra 16) -e 0.01.

[153,152]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

Não foi possível encontrar controles suficientes.

O SECTE neste caso não conseguiu colocar todas as tensões na faixa de 0.95 a 1.05 pu, restando sobretensões nas barras 153 (1.082) e 152 (1.072).

O programa de otimização, utilizando seleção de um controle por violação, para minimizar o número de modificações, também não conseguiu trazer todas as tensões para a faixa [0.95, 1.05], encontrando solução apenas quando relaxa algumas restrições. Ao final de três iterações as tensões nas barras 153(1.082), 152(1.074) e 139(1.052) ficam fora da faixa [0.95, 1.05] e foram alteradas 4 tensões de geração e uma posição de tap. Similarmente o

SECTE alterara 4 tensões de geração e 4 taps (4 transformadores em paralelo, o que pode ser considerado um controle).

Quando o programa de otimização é executado sem seleções de controles consegue trazer todas as tensões para a faixa [0.95, 1.05] mas são alterados 68 controles.

6.3.5 - Caso 4 - Sistema Sul-Sudeste 176 Barras (Simulador)

Este sistema teste foi formado a partir dos dados do sistema utilizado no simulador para o horário da 1:00h da madrugada e já efetuando algumas alterações nas posições dos taps sugeridas pelo fluxo de potência que faz parte do pacote do simulador. Tanto os dados físicos como os ajustes nos controles são os mostrados no Apêndice B.

Após uma primeira execução do programa de fluxo de potência e cálculo de sensibilidades são constatadas as violações mostradas na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Violações iniciais

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
176	1.129	173	1.090	149	1.069	157	1.059
153	1.118	15	1.087	165	1.069	17	0.942
152	1.112	174	1.080	164	1.067	76	0.942
175	1.106	163	1.079	100	1.065	154	1.057
151	1.102	150	1.075	169	1.061	92	1.056
172	1.098	166	1.070	74	0.939	94	1.056
						155	1.052

Estes dados representam o sistema em um período de carga mínima, logo há problemas sérios de sobretensão, além de alguns problemas de subtensão. Os resultados de uma primeira consulta ao SECTE São apresentados a seguir.

Resultados da primeira consulta ao SECTE

Período de carga = 4 (mínima)

Lista das barras com violações = [176,153,152,175,151,172,173,15,174,163,150,166,149,165,164,100,169,74,157,17,76,154,92,94,155]

Há 25 violações.

Qual o número máximo de controles que podem ser alterados?

|: 10.

Reator da barra Blumenau está desligado.
Sugiro ligar este reator.

Como esta versão do SECTE não tem interface automática com os programas em FORTRAN, o operador acrescenta este reator(150MVar) na barra de Blumenau 500 kV e executa um novo fluxo de potência e faz uma segunda consulta ao SECTE. As violações após o acréscimo do reator são mostradas na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Violações após inclusão do reator na SE Blumenau

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
153	1.112	74	0.926	17	0.939	163	1.055
152	1.107	76	0.923	157	1.057	92	1.054
151	1.096	175	1.077	15	1.056	94	1.054
172	1.090	174	1.073	149	1.056	10	0.948
173	1.082	100	1.064	165	1.056	14	0.948
176	1.081	150	1.063	154	1.055		

Resultados da segunda chamada ao Secte

Período de carga = 4 (mínima)

Lista das barras com violações = [153,152,151,172,173,176,74,76,175,174,100,150,17,157,15,149,165,154,163,92,94,10,14]

Há 23 violações.

Qual o número máximo de controles que podem ser alterados?

|: 10.

O controle com maior influência na barra 153 é o número 15, que tem sensibilidade igual a 0.240.

Alteração no controle 15 (vger - barra 95) é -0.038.

[153,152,172,151,173,176,74,175,76,174,17,150,157,165,149,15,163,100,14,10]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: n.

O controle de maior influência na barra 153 é o número 16, que tem sensibilidade igual a 0.237.

Alteração no controle 16(vger - barra 96) é -0.02.

[153,152,172,173,151,176,74,76,175,174,17,150,157,15,149,165,163,10,14]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

O controle com maior influência na barra 172 é o número 27, que tem sensibilidade igual a 0.087.

Alteração no controle 27 (vger - barra 116) é -0.05.

Alteração no controle 28 (vger - barra 117) é -0.05.

Alteração no controle 29 (vger - barra 118) é -0.05.

[153,152,151,74,76,172,176,173,175,10,14,17,174,150,157,165,149,163,100]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

O controle com maior influência na barra 74 é o número 98, que tem sensibilidade igual a -0.253.

Alteração no controle 98 (tap - barras 133/76) é de -0.04.

Alteração no controle 97 (tap - barras 133/76) é de -0.04.

Alteração no controle 96 (tap - barras 133/76) é de -0.04.

[153,152,151,172,176,173,175,10,14,17,174,150,157,149,165,163]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

O controle com maior influência na barra 10 é o número 82, que tem sensibilidade igual a -0.478.

Alteração no controle 82 (tap - barras 119/10) é -0.01.

Alteração no controle 81 (tap - barras 119/10) é -0.01.

[153,152,151,172,176,173,175,14,17,174,150,157,165,149,163,10]

Como já foram selecionados 10 controles o sistema pára e através de uma nova execução do fluxo de potência pode-se verificar o efeito dos controles selecionados. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.13. Foram criadas novas violações em algumas barras após estas correções. Estas violações são, no entanto, de pequena magnitude e no geral o perfil de tensões apresenta razoável melhora.

Tabela 6.13 - Violações após primeiras correções

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
153	1.094	17	0.937	74	0.945	10	0.947
152	1.088	175	1.062	97	0.945	27	0.947
151	1.077	14	0.938	98	0.945	29	0.947
172	1.076	174	1.059	150	1.055	11	0.948
176	1.068	12	0.942	26	0.946	28	0.948
173	1.067	30	0.944	157	1.054	76	0.948

Resultados da terceira consulta ao SECTE

Período de carga = 2 (média)

Lista das barras com violações: [153,152,151,172,176,173,17,175,14,174,12,30,74,97,98,150,26,157,10,27,29,11,28,76].

Há 24 violações.

Qual o número máximo de controles a serem alterados?

|: 5.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

O controle com maior influência na barra 17 é o número 1, que tem sensibilidade igual a 0.904.

Alteração no controle 1 (vger - barra 16) é 0.014.

[153,152,151,172,176,173,175,14,174,12,30,150,98,97,74,157,26,29,27,10,76,28,11]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): n.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.): *n*.

O controle com maior influência na barra 14 é o número 48, que tem sensibilidade igual a -0.932.

Alteração no controle 48 (tap - barras 44/14) é -0.01.

[153,152,151,172,176,173,175,174,12,30,74,97,98,150,26,157,10,27,29,11,28,76,14]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: *y*.

Qual barra da lista de barras com violações?

|: 12.

O controle com maior influência na barra 12 é o número 110, que tem sensibilidade igual a -0.930.

Alteração no controle 12 (tap - barras 144/12) é -0.01.

[153,152,151,172,176,173,175,174,30,150,98,97,74,157,26,29,27,10,76,28,11,14]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: *y*.

Qual barra da lista de barras com violações?

|: 30.

O controle com maior influência na barra 30 é o número 118, que tem sensibilidade igual a -0.913.

Alteração no controle 118 (tap - barras 147/30) é -0.005.

[153,152,151,172,176,173,175,174,74,97,98,150,26,157,10,27,29,11,28,76,14,30]

Deseja corrigir alguma barra específica? (y./n.)

|: *y*.

Qual barra da lista de barras com violações?

|: 74.

O controle com maior influência na barra 74 é o número 98, que tem sensibilidade igual a -0.269.

Alteração no controle 98 (tap - barras 133/76) é -0.005.

Alteração no controle 98 (tap - barras 133/76) é -0.005.

Alteração no controle 98 (tap - barras 133/76) é -0.005.

[153,152,151,172,176,173,175,174,150,98,97,157,26,29,27,10,28,11,14,30,74]

Após estes controles os dados do sistema são novamente atualizados para incluir estas correções e um novo fluxo de potência é executado. As violações remanescentes são mostradas na Tabela 6.14. O usuário pode parar o processo neste ponto ou continuar as correções mas como pode-se observar nas sugestões da terceira chamada ao SECTE, apenas estão sendo encontrados controles para as barras com pequenas violações.

Tabela 6.14 - Violações ao final do processo

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
153	1.094	173	1.067	150	1.055	29	0.947
152	1.088	175	1.062	157	1.054	11	0.948
151	1.077	174	1.059	10	0.947		
172	1.076	97	0.945	26	0.947		
176	1.068	98	0.945	27	0.947		

Empregando-se o programa de otimização, novamente com a seleção de um controle por barra com violação e com o sistema já incluindo o reator na barra de 500kV da SE Blumenau, foram necessárias 3 iterações e feitas alterações em 10 tensões de geração e 6 taps para a correção, que deixou 13 tensões fora da faixa [0.95, 1.05], sendo a maior violação na barra 153: 1.099 pu. Portanto, o número de controles alterados foi similar, já que o SECTE alterou 6 tensões de geração e 11 taps em duas iterações após a inclusão do reator. Convém lembrar que o SECTE sempre move em conjunto transformadores e barras de geração que estejam em paralelo, o que aparentemente aumenta o número de controles selecionados.

6.3.6 - Caso 5 - Solução através de chaveamento - Sistema 176 Barras

Até agora os limites de tensão têm sido considerados iguais a 0.95 e 1.05 para todas as barras de carga e geração, mas na prática nem sempre estes limites são satisfatórios ou realizáveis. Algumas subestações e usinas costumam ter valores da permitida de tensão, assim como o valor desejado para a mesma, definidos nas instruções de operação. Por exemplo, para o barramento de 138kV da SE Blumenau os valores desejados de tensão são de 145kV para operação em carga pesada e média, 138kV para operação em carga leve e 136 kV para operação em carga mínima.

Em algumas situações os controles via reatores/capacitores, taps e tensão de geração não são suficientes para manter as tensões em determinadas barras em seus valores especificados e são então empregados como um último recurso o chaveamento de ramos da rede.

Neste caso será mostrado o exemplo da SE Timbó 69/24kV, da CELESC, cujo unifilar é apresentado na Figura 6.3. Este unifilar pode ser selecionado no ambiente do simulador com um clique do “mouse” sobre a SE Timbó no unifilar da região do vale do Itajaí, mostrado anteriormente na Figura 6.2.

Os chaveamentos podem ser simulados neste ambiente, bastando para isto que se dê dois cliques sobre o equipamento (disjuntor ou seccionadora) cujo estado deve ser alterado. As alterações nos valores de tensão nas barras e fluxos nas linhas causados pelos chaveamentos são verificados na execução subsequente do fluxo de potência.

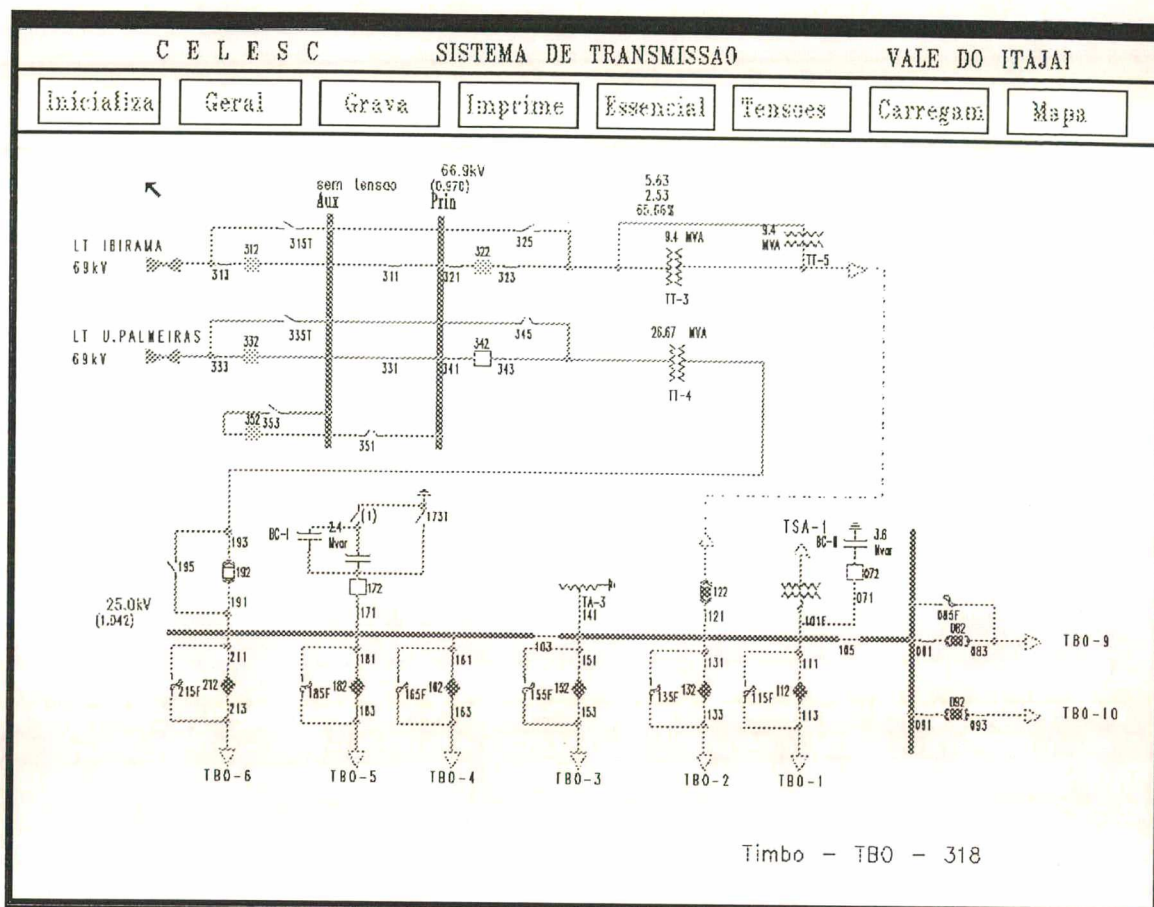


Figura 6.3 - Unifilar da SE Timbó (69/24 kV)

Vários alimentadores saem da barra de 24 kV da SE Timbó e nos períodos de carga leve e mínima não são desejáveis tensões superiores a 24.1 kV (1.004 pu) neste barramento. Devido a falta de opções de controle nesta barra (transformadores têm tap fixo), os chaveamentos do transformador TT4 e da LT Timbó/ US. Palmeiras 69 kV são considerados de nos procedimentos operativos da CELESC, como pode ser observado no trecho transcrito abaixo.

Dias úteis (2ª a 6ª)

Das 00:00 as 05:00h e das 23:00 as 24:00h, retirar de operação o TT4 (20/26.6MVA)

Caso ocorram tensões permanentes superiores a 24.1 kV(1.004 pu), desligar a LT Timbó - US Palmeiras 69 kV.

Caso ocorram tensões permanentes inferiores a 23.4 kV(0.975 pu), colocar em operação o BC (2,1 MVar) ou voltar com o TT4.

Para melhor exemplificar este caso pode-se voltar aos resultados finais do caso 2, que reproduz o sistema a 1:00h da madrugada. A tensão na barra 15 (Timbó 24 kV) fechou a 1.049, acima dos limites almejados pela operação da CELESC, de 1.004 pu. Como o SECTE não encontra solução, o primeiro passo então é desligar do transformador TT4 e voltar a observar as tensões, apresentadas na Tabela 6.15, agora já definindo o limite na barra 24 kV da SE Timbó em 1.004 pu.

Tabela 6.15 - Violações após desligar o TT4 da SE Timbó

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
153	1.094	176	1.068	98	0.945	27	0.947
152	1.088	173	1.067	150	1.055	29	0.947
15	1.040	175	1.062	157	1.054	11	0.948
151	1.077	174	1.059	10	0.947	28	0.948
172	1.076	97	0.945	26	0.947	30	0.948

Como a tensão na barra 15 não baixou ainda o suficiente, desliga-se a LT Timbó - US Palmeiras 69 kV ao invés do TT4 e observa-se as tensões mostradas na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Violações após desligar a LT Timbó - US Palmeiras 69 kV

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
33	0.895	14	0.928	174	1.059	150	1.055
32	0.900	176	1.068	45	0.942	10	0.946
153	1.094	173	1.067	46	0.942	26	0.946
152	1.088	44	0.934	28	0.943	27	0.946
151	1.077	175	1.062	97	0.945	157	1.054
172	1.076	29	0.939	98	0.945	11	0.948

Após estes chaveamentos a tensão na barra 15 caiu para 0.990pu, como desejado, mas como algumas novas violações foram criadas, pode-se fazer uma nova consulta ao SECTE, para tentar melhorar o perfil de tensões.

O SECTE sugere então os seguintes controles:

Primeira chamada após chaveamentos

- alterar controle 48 (tap - barras 44/14) em -0.025;
- alterar controle 120 (tap - barras 147/46) em -0.025;
- alterar controle 119 (tap - barras 147/46) em -0.025;
- alterar controle 83 (tap - barras 120/28) em -0.01;
- alterar controle 118 (tap - barras 147/30) em -0.01;
- alterar controle 107 (tap - barras 142/98) em -0.005;
- alterar controle 106 (tap - barras 142/98) em -0.005;
- alterar controle 105 (tap - barras 142/98) em -0.005;
- alterar controle 12 (vger - barra 84) em -0.049;
- alterar controle 83 (tap - barras 119/10) em -0.005;

Segunda chamada após chaveamentos

- alterar controle 116 (tap - barras 146/26) em -0.005;
- alterar controle 117 (tap - barras 146/27) em -0.005;
- alterar controle 104 (tap - barras 138/11) em -0.005;
- alterar controle 98 (tap - barras 133/76) em -0.005;
- alterar controle 97 (tap - barras 133/76) em -0.005;
- alterar controle 96 (tap - barras 133/76) em -0.005;
- alterar controle 17 (tap - barra 102) em -0.003;
- alterar controle 18 (tap - barra 103) em -0.003;
- alterar controle 19 (tap - barra 104) em -0.003;
- alterar controle 20 (tap - barra 105) em -0.003;
- alterar controle 21 (tap - barra 106) em -0.003;
- alterar controle 22 (tap - barra 107) em -0.003;

Desta forma a tensão na barra 15 termina em 0.993 pu, portanto abaixo do limite máximo definido e restam as violações mostradas a seguir (na Tabela 6.17), sendo que algumas das quais poderiam ainda ser corrigidas.

Tabela 6.17 - Violações finais - Após chaveamentos e correções

Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão	Barra	Tensão
33	0.909	151	1.073	73	0.945	97	0.948
153	1.090	173	1.067	7	0.947	98	0.948
32	0.915	176	1.066	44	0.948	157	1.051
152	1.085	175	1.061	57	0.948		
172	1.075	174	1.059	58	0.948		

Os chaveamentos, por terem sido efetuados no setor de 24 e 69kV e em uma parte não muito malhada do sistema, tiveram efeito restrito às barras da SE Timbó e subestações próximas. No geral não diminuíram o número de violações ou a magnitude da maior violação do sistema, mas sanaram o problema de sobretensão nos alimentadores 24kV da SE Timbó quando não havia outras opções de controle. A tensão na barra 33, setor de 69 kV da SE Timbó, foi bastante reduzida devido aos chaveamentos para reduzir a tensão na barra 15, setor de 24 kv desta mesma subestação. Como não há ponto de entrega para consumidor na barra 33, a tensão de 0.91 pu na mesma é tolerável.

O tempo dispendido em cada consulta ao sistema especialista varia de acordo com o sistema de dados utilizado, com o número de violações a serem corrigidas e com o limite no número de controles a serem alterados em uma consulta. Este tempo também está relacionado com a facilidade do sistema encontrar controles disponíveis que não causem novas violações se utilizados. No exemplo do sistema 39 barras, com 19 violações e 4 controles selecionados o tempo foi de 0,65 segundos. Para o sistema 176 barras no caso de 23 violações este tempo foi de 12,15 segundos quando definiu-se o número máximo de controles selecionados em 10 e 3,48 segundos quando este número foi 5.

6.4 - DIFICULDADES ENCONTRADAS NO DESENVOLVIMENTO DESTES TRABALHOS

Uma dificuldade inicial foi a obtenção dos dados de um sistema real, no caso o sistema sul-sudeste brasileiro. Estes dados tornaram-se disponíveis apenas quando o Grupo de Sistemas de Potência da UFSC começou o desenvolvimento do simulador de sistemas de energia para estudos e treinamento (SET) em conjunto com a CELESC, em outubro de 1993.

Inicialmente a idéia era validar o SECTE na etapa de trabalho na Universidade de Brunel, pois lá estaria disponível o ambiente POPLOG, que possibilitaria a interface FORTRAN/PROLOG, e o simulador desenvolvido pelo Instituto de Sistemas de Potência desta universidade poderia ser empregado para sua validação. Entretanto não foi possível utilizar este simulador por várias razões:

- o mesmo se encontrava desativado;
- utilizava como base o sistema de dados IEEE 30 barras, pequeno e simples demais para possibilitar a validação do SECTE;
- se instalado, o simulador ficaria em computador diferente do POPLOG, o que obrigaria ao desenvolvimento de alguma forma de interface entre eles.

Devido a estas dificuldades, ao período de tempo limitado e ao fato da UFSC também estar desenvolvendo um simulador, a fase de validação do sistema especialista foi adiada para a etapa final do trabalho na UFSC.

O SET, embora ainda não esteja com todas as suas funções instaladas e validadas, foi bastante útil na avaliação do SECTE, principalmente na parte da seleção dos controles baseados em sensibilidades, ou seja, posição de taps de transformadores e tensão de geração, pois a alteração destes controles na tela é simples e mais rápida que em arquivos de dados. No entanto, devido a simplificações feitas na elaboração das curvas de carga do sistema e na modelagem da rede externa, tornou-se difícil reproduzir alguns casos que ocorrem no sistema real no ambiente do simulador. Desta forma regras encontradas nas instruções de operação da ELETROSUL não puderam ser incluídas na base de conhecimento do SECTE porque as situações propícias a sua aplicação não ocorrem no simulador. Estas situações ocorriam freqüentemente antes da ELETROSUL instalar o reator de 150 MVar na barra de 500 kV da SE Blumenau.

Um exemplo destas regras é:

Caso ocorram níveis elevados de tensão na área de Curitiba e Blumenau, nos horários de carga leve (domingos e feriados) e mínima, adotar a seguinte seqüência de procedimentos, na ordem de prioridade:

- *manter em operação dois reatores de 150 MVar na SE Curitiba,*
- *operar com tensão terminal mínima em GBM, GBS, Salto Santiago e Jorge Lacerda,*
- *manter a tensão de Ivaiporã no valor inferior da faixa recomendada,*
- *abrir uma das LT's de 525 kV Areia-Curitiba (circuito I ou II)*

O exemplo do caso 5, mostrado anteriormente, apresenta uma situação onde são necessários chaveamentos para controlar a tensão em uma barra, e deixa clara a conveniência de se lidar com este tipo de procedimento através de um sistema especialista. Para que o SECTE possa tratar de outros casos similares é necessário que o simulador, ou mais precisamente, a base de dados do sistema simulado, seja modificada com o objetivo de se aproximar mais do comportamento do sistema sul-sudeste real.

6.5 - CONCLUSÕES GERAIS

O sistema desenvolvido neste trabalho propôs o uso de um sistema especialista para controle de tensão que fosse capaz de trabalhar com os controles usuais, tensões de geração e posição de tap, mas também com chaveamentos. Estes chaveamentos podem ser de bancos de capacitores ou reatores shunt e de linhas de transmissão, as quais costumam ser desligadas em alguns casos específicos, geralmente para corrigir sobretensões em períodos de carga leve e mínima. O tratamento a este tipo de controle costuma ser apenas a partir de procedimentos descritos em forma de regras, para serem utilizadas pelos operadores/despachantes do sistema. Então, quando as condições requisitadas são satisfeitas, o ramo pode ser ligado ou desligado para controle de tensão.

O sistema especialista SECTE parte dos resultados fornecidos por um programa de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson. Outros dados necessários ao SECTE são os valores das sensibilidades dos controles x barras de carga. Estes dois programas foram desenvolvidos em outros trabalhos do Grupo de Sistemas de Potência da USFC.

Para possibilitar uma verificação do efeito dos chaveamentos de forma mais rápida do que rodando um fluxo de potência foi desenvolvido um programa de simulação baseado na técnica da diacóptica. O método desenvolvido para simulação de retirada de elementos mostrou bons resultados tanto no aspecto de precisão quanto no aspecto de consumo de tempo computacional. Pode então ser utilizado tanto para uma avaliação mais rápida do efeito de uma manobra em tempo real quanto para busca da manobra ótima em estudos "off line".

Os resultados fornecidos pelo SECTE também foram satisfatórios. Como pode ser observado nos testes anteriores, o sistema especialista mostra vantagem quando comparado aos métodos tradicionais, em relação ao número de controles alterados para corrigir violações

quando o número de violações não é muito grande ou quando as mesmas estão relacionadas. Além disso, mesmo nos casos mais severos, quando não foi possível trazer todas as barras para a faixa de tensões desejada, o SECTE conseguiu encontrar uma solução, capaz de amenizar as violações e/ou diminuir o número das mesmas. O SECTE mostrou-se conveniente para correções em tempo real, principalmente em situações de emergência, pois por selecionar um número reduzido de controles, facilita ao operador a tarefa de ter que implementá-los. No caso de várias chamadas ao SECTE o operador pode alterar os controles sugeridos a cada iteração, não necessitando chegar ao final do processo. No entanto, como este sistema pode levar vários controles aos seus limites, aconselha-se que de tempos em tempos seja executado um fluxo de potência para otimização do ponto de operação.

O SECTE pode ter a sua aplicabilidade limitada para casos onde as violações não sejam severas, ou seja, devendo permanecer no espaço onde as regras heurísticas e as sensibilidades calculadas sejam válidas. Contudo este limite é de difícil definição e caso tente-se usar o SECTE para casos além da sua competência, o máximo que pode ocorrer será ele não encontrar soluções ou encontrar soluções que não se mostrem satisfatórias quando confirmadas pela execução de um fluxo de potência.

A validação do SECTE contou com auxílio do simulador do sistema CELESC que se encontra em fase final de desenvolvimento no Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC que forneceu os casos teste. Esta etapa de validação foi prejudicada devido a falta de interface entre o simulador e o SECTE, que se disponível, possibilitaria maior número de testes em menor período de tempo. Na etapa de desenvolvimento deste sistema na Universidade de Brunel foi implementada a interface entre o sistema baseado no conhecimento e os programas em FORTRAN, o que levou a uma considerável economia de tempo computacional e simplicidade no uso do sistema.

6.6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Complementação da Base de Conhecimento do SECTE

Após consultas com a ELETROSUL e CELESC a fim de conseguir as informações necessárias:

- incluir regras para chaveamento (retirada e retorno) de todos bancos shunt que fazem parte do sistema representado no simulador.
- Definir todos os limites das barras de geração e de carga de acordo com os períodos de carga (a estrutura para tanto já está montada).

Aumentar Base de Conhecimento do SECTE

- Incluir regras para lidar com a prevenção a problemas de colapso de tensão, através de índices ou reconhecimento de padrões.

Desenvolver Interface FORTRAN/PROLOG, de forma a integrar o SECTE ao Simulador.

Quando esta interface estiver pronta o controle de tensão poderá ser feito através de um programa de otimização com objetivos econômicos sendo executado por exemplo de hora em hora e pelo SECTE durante este intervalo para fazer ajustes de emergência.

Aprimorar Interface com o Usuário

Uma vez integrado ao ambiente do simulador a interface entre o sistema especialista e o usuário também poderá ser através de janelas e com uso do “mouse”.

Aprimorar Capacidade Explanatória do SECTE

Simulação Inclusão de Ramos

Adaptar o método desenvolvido para que seja capaz de simular a inclusão de linhas, transformadores e elementos shunt.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manobras

- [01] - TINNEY, W. F. - "Compensation Methods for Network Solutions by Optimally Ordered Triangular Factorization" - IEEE Trans. Power App. Syst. - PAS-91 - pp 123-127, 1972.
- [02] - SACHDEV, M. S.; IBRAHIM, S. A. - "A Fast Approximate Technique for Outage Studies in Power System Planning and Operation". IEEE Transactions on Power System Apparatus and Systems, Vol. 92, pp 1133-1142, 1974.
- [03] - VAN AMERONGEN, R. A. M. ; VAN MEETEREN, H. P. - "Security Control By Real Power Rescheduling, Network Switching and Load Shedding". CIGRE Report N° 32-02, August 27 - Sept./1980.
- [04] - KOGLIN, H. J. ; MULLER, H. - "Overload Reduction Through Corrective Switching Actions". Proc. of International Conference on Power System Monitoring and Control, London - pp 159-164, jun./1980.
- [05] - DODU, J. C. ; MERLIN, A.; DAVID, J. M. - "On the Search of Optimal Switching Configuration in Power Transmission System Studies". Proceedings of the Seventh Power System Computation Conference (7th PSCC), Lausanne, pp 281-292, 1981.
- [06] - MAMANDUR, K. R. C.; BERG, G. J. - "Efficient Simulation of Line and Transformer Outages in Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 10, pp 3733-3741, 1982.
- [07] - ALSAÇ, O.; STOTT, B.; TINNEY, W. F. - "Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solutions"- IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, N° 5, pp 1050-1060, May/83.
- [08] - GLAVITSCH, H.; KRONIG H.; BACHER, R. - "Combined Use of Linear Programming and Load Flow Techniques in Determining Optimal Switching Sequences". Proc. of 8th PSCC, Helsinki, 1984.

- [09] - KOGLIN, H. J.; MEDEIROS Jr, M. F. - "Corrective Switching by Means of Optimal Strategy" - Proc. of CIGRE/IFAC Symposium, Rio de Janeiro, 1985.
- [10] - GLAVITSCH, H. - "State of Art Review Switching as Means of Control in Power System". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 7, N° 2, pp 92, 1985
- [11] - MAZI, A. A.; WOLLEMBERG, B. F.; HESSE, M. H. - "Corrective Control of Power System Flows by Line and Busbar Switching". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, N° 3, pp 258-265, 1986.
- [12] - BACHER, R.; GLAVITSCH, H. - "Network Topology Optimization With Security Constraints". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, N° 4, pp 103, 1986.
- [13] - MACHADO, L. J. B.; UNGARETTI, V. S. - "Exame de Alternativas de Controle Via Mudanças na Topologia da Rede, Visando o Alívio de Sobrecargas Dentro do Despacho de Segurança em Tempo Real". Anais do 9º.Congresso Chileno de Engenharia Elétrica, Santiago, Chile, 1987.
- [14] - BAKIRTZIS, A.G.; MELIOPOULOS, A.P.S. - "Incorporation of Switching Operations in Power System Corrective Control Computations". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, N° 3, pp 669-676, 1987.
- [15] - GORENSTIN, B. G.; TERRY, L. A.; PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G. - "A Framework for Integration of Network Topology Optimization and Generation Rescheduling in Power System Security Applications". Proc. of Power System Computation Conference, Lisboa, Portugal, 1987.
- [16] - UNGARETTI, V. S. - "Determinação de Alternativas de Controle via Mudanças na Topologia da Rede para Alívio de Sobrecargas em Tempo Real". Dissertação de MSc, UFSC, Florianópolis, SC, maio/1987.
- [17] - BEZERRA, A. C. G.; CERQUEIRA NETO, F. F. - "Desempenho de Linhas de Transmissão sob Efeitos de Surtos de Manobra" - Anais do IX SNPTEE - artigo GLT/10, Belo Horizonte, 1987.
- [18] - CAVATI, C. R.; PRADA, R. B. - "Redução de Sobrecargas Através de Ações de Chaveamento de Circuitos". Anais do 7º Congresso Brasileiro de Automática, Vol 2, pp 782-788, São José dos Campos, 1988.

- [19] - FREITAS E SILVA, J.O. - "Estudo de Alternativas de Controle Preventivo e/ou Corretivo Através de Manobras Sobre a Topologia da Rede". Dissertação de MSc, UFSC, Florianópolis, SC, Julho/1989.
- [20] - SKOKLJEV, I. A. - "Network Switching Model Based on the Upgraded Mamandur-Berg Method". Electric Power Systems Research, N° 22, pp 203, 1991.
- [21] - MACHADO, L.J.B. - "Simulador de Sistemas Elétricos para Treinamento de Operadores 4o EDAO, Encontro para Debates dde Assuntos da Operação. CESP, São Paulo, SP, Nov./93.
- [22] - ROLIM, J.G.; MACHADO, L.J.B. - "Técnica C.A. para Simulação de Inclusão/Retirada de Linhas de Transmissão, Transformadores e Elementos Shunt em Sistemas de Potência"- 10º Congresso Brasileiro de Automática - Set./94 - Rio de Janeiro - Brasil.

Sistemas Especialistas

- [25] - McCLELLAND, E.C.; VAN HORNE, P.R. - "Fast Voltage Prediction Using a Knowledge Based Approach"- IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-102, No 2, pp 315-319 - Feb./83.
- [26] - LIU, C. C.; TOMSOVIC, K. - "An Expert System Assisting Decision Making of Reactive Power/Voltage Control" - Proc. of Power Industry Application Conference, pp 242-248, May/1985.
- [27] - DOI, A.; UEMURA, K. - "Knowledge-Based Operation Guidance Method for Voltage and Reactive Power Control in Power Systems" - Proc. IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, pp 457-462, July/1985
- [28] - BROWSTON, L.; FARRELL, R.; MARTIN, N. - Programming Expert Systems in OPS5, Addison-Wesley, 1985.
- [29] - HARMON, P.; KING, D. - Expert Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- [30] - TALUKDAR, S. N.; CARDOZO, E. - "Artificial Intelligence Technologies for Power System Operations" - EPRI Report EL 4323, 1986.

- [31] - WATERMAN, D. A. - A Guide to Expert Systems, Addison -Wesley, 1986.
- [32] - ALAGIC, S. - Relational Database Technology, Springer-Verlag New York Inc., 1986
- [33] - SAKAGUCHI, T.; TANAKA, H.; UENISHI, K.; GOTOH, T.; SEKINE, Y - "Prospects of Expert Systems in Power System Operation". *Electrical Power & Energy Systems*; Vol. 10, Nº 2, pp 71-82, April/1988.
- [34] - PAILLET, O.; DUBOST, L - "AMPERE - A knowledge-based system for network reconfiguration" - Symposium on Expert System Applications to Power Systems (ESAP), Stockholm-Helsinki, pp 8~32-8~38 - Aug./88.
- [35] - PÜTTGEN, H. B.; GODART, T. F. - "A Sensitivity Driven Voltage Control - Reactive Allocation Expert System" - ESAP, Stockholm-Helsinki, pp 15~20-15~27, Aug./88.
- [36] - VU, K.; MA, T. K.; FISCHL, R.; LIU, C-C - "An Expert System for Voltage Security Assessment" - ESAP, Stockholm-Helsinki, pp 15~1-15~6, Aug./88.
- [37] - CHENG, S. J.; MALIK, O. P.; HOPE, G. S. - "An Expert System for Voltage and Reactive Power Control of a Power System" - *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, Nº 4, pp 1449-1455, Nov./88.
- [38] - DELFINO, B.; DENEGRI, G. B.; INVERNIZZI, M.; CANONERO, A.; FORZANO, P. - "Knowledge Based Approaches to Line Overloads Alleviation - A Comparative Study" - Second ESAPS, Seattle - USA, pp 341 - 347, July/89.
- [39] - TOMSOVIC, K.; BARRUNCHO, L. - "Petri Net Representation as an Evaluation Method for a Voltage Control Expert System" - Second ESAPS, Seattle - USA, pp 409-415, July/89.
- [40] - SASAKI, H. et al. - "A Novel Scheme for Validation and Verification of Rule Bases in Expert Systems" - Second ESAPS, Seattle - USA, pp 416-422, July/89.
- [41] - WILHEMSSON, K.; ANDERSON, G. - "Reactive Power and Voltage Control - A Knowledge-Based Approach" - Second ESAPS, Seattle - USA, pp 428 - 436, July/89.

- [42] - PENG, T.M.; KARADY, G.G.; HSU, J.C. - "An Expert System for Voltage Control Integrated with Existing Software Environment"- Second ESAPS, Seattle - USA, pp 444 - 450, July/89.
- [43] - BARRUNCHO, L.; SUCENA PAIVA, J. P.; LIU, C-C - "Voltage/Var Control Optimization and Knowledge Oriented Approach - An Application for the Present Run-Time Environments" - Second ESAPS, Seattle - USA, pp 451 - 457, July/89.
- [44] - DELFINO, B.; DENEGRI, G. B.; INVERNIZZI, M.; CANONERO, A.; FORZANO, P.- "An Intelligent Supporting Aid for Resolving Operations under Overload Conditions in Electric Power Systems", Vol. 12, Nº 3, pp 183-191, July 1990.
- [45] - DILLON, t. s.; LAUGHTON, M. A. - Expert System Applications in Power Systems - Prentice Hall, 1990.
- [46] - YUTIAN, L.; SEN Z. - "Research on Assisting Decision-Making of Reactive Power/ Voltage Control By Expert System Technology" - Third ESAPS, Tokyo-Kobe - Japan, pp 40 - 43, April/91.
- [47] - BARRUNCHO, L. M. F.; PESTANA, R.; VIDIGAL, A.; LIU, C-C - "Reactive Management and Voltage Monitoring and Control" - Third ESAPS, Tokyo-Kobe - Japan, pp 165-172, April/91.
- [48] - BALU, N.J.; ADAPA,R.; CAULEY,E.; LAUBY, M.; MARATUKULAM,D.J. - "Review of Expert Systems in Bulk Power System Planning and Operation" - Proc. of IEEE, Vol. 80, Nº 5, pp 727-731, May/1992.
- [49] - GERMOND, A.; NIEBUR, D. - "Survey of knowledge Based Systems in Power Systems: Europe" - Proc. of IEEE, Vol. 80, Nº 5, pp 732-740, May/1992.
- [50] - HOLEN, A. T.; BOTNEN, A.; STØA, P.; KERONEN, J. J. - "Coupling Between Knowledge-Based and Algorithmic Methods" - Proc. of IEEE, Vol. 80, Nº 5, pp 745-757, May 1992.
- [51] - GOÊS, N.L.; RICHARDS, E.F.; TWEED, E.D. - "An Electric control center operator's assistant expert system" - Electric Power Systems Research, Vol. 25, pp 239-246, 1992.

- [52] - BARRUNCHO, L.M.F.; SUCENA PAIVA, J.P.; LIU C-C; PESTANA, R.; VIDIGAL, A. - "Reactive management and voltage monitoring and control" - Electrical Power & Energy Systems - Special Issue - Expert Systems Applications in Power Systems - Vol. 14, Num 2/3, pp 144-157, April/June - 92.
- [53] - SANNES, T. - "Removal of overloads and voltage problems using a hybrid knowledge-based system"- Electrical Power & Energy Systems - Special Issue - Expert Systems Applications in Power Systems - Vol. 14, Num 2/3, pp 199-205, April/June - 92.
- [54] - SINGH, S.P.; RAJU, G.S.; GUPTA, A.K. - "Sensitivity based expert system for voltage control in power system" - Electrical Power & Energy Systems - Vol. 15, Num. 3, pp 131-136, 1993.
- [55] - SEKINE, Y.; ITO, S-I - "AI Application to Power Systems in Japan" - Athens Power Tech Conference, Athens - Greece, pp 921-925, Sept./93.
- [56] - OMAR, N. - "Introdução aos Sistemas Especialistas" - Minicurso do 9º Congresso Brasileiro de Automática - Vitória, 1992.
- [57] - TANSCHKEIT, R. - "Controle Nebuloso" - Minicurso do 9º Congresso Brasileiro de Automática - Vitória, 1992.
- [58] - KING, D.G. - "Artificial Intelligence in Real-Time System Design" - Minicurso CPGCC /UFSC, agosto/1992.
- [59] - CIGRE TASK FORCE 39.03 - "Exploring User Requirements of Expert Systems in Power System Operation and Control" - ÉLECTRA, Nº 146, pp 69-83, Feb./93.
- [60] - RANAWEERA, D.K.; KARADY, G.G. - "Expert system for energization of lightly loaded transmission lines" - Electrical Power & Energy Systems - Vol. 15, No 6, pp 397-403, 1993.
- [61] - "A Tutorial Course on Knowledge-Based System Techniques with Applications to Power Systems - IEEE Power Engineering Society, Oct./93.
- [62] - LE, T.T.; PIEKUTOWSKI, M. - "An Expert System for Voltage Control and Reactive Power Compensation Planning in the H.E.C. system" - Fourth ESAPS - Melbourne, Australia - pp 266-271, 1993.

- [63] - GYOQING, T.; HONGYUAN, X.; CHEN, H. - "An Expert System for Voltage/Var Control of Interconnected Power Systems" - Fourth ESAPS - Melbourne, Australia - pp 292-295, 1993.
- [64] - RAZANAMAMPANDRY, J.; CHAMOREL, P.-A.; GERMOND, A.J. - "Expert System for Voltage & Var Control" - Fourth ESAPS - Melbourne, Australia - pp 296-302, 1993.
- [65] - SUTANTO, D.; LACHS, W.R.; ZHU, Y.L. - "Automatic Control of Voltage Stability By an Expert System Utilising Pattern Recognition Technique" - Fourth ESAPS - Melbourne, Australia - pp 303-308, 1993.
- [66] - ALBA, J.J. et al. - "Integration of knowledge-based tools in an EMS environment: guide-lines and case study" - Fourth ESAPS - Melbourne, Australia - pp 473-478, 1993.
- [67] - TERANO, T. - "A Checklist Guideline for Expert System Evaluation" - Fourth ESAPS - Melbourne, Australia - pp 656-661, 1993.
- [68] - McLAUGHLIN, L.A.; CHRISTIE, R.D. - "Are Expert Systems Rules Really Easier to Modify?" - Symposium on Intelligent Systems Applied to Power Systems (ISAP), France, pp 111-117, Sept/1994.
- [69] - SANCHÁ, J.L.; FERNÁNDEZ, J.L.; HEBRERO, J. - "SEGRE - An Expert System for Reactive Power Management in Electric Power Systems" - Symposium on Intelligent Systems Applied to Power Systems (ISAP), France, pp 389-395, Sept/1994.
- [70] - WIELEMAKER, J. - SWI-Prolog 1.6 - Reference Manual - University of Amsterdam, 1992
- [71] - HUNEAULT, M.; ROSU, C.; MANOLIU, R.; GALIANA, F.D. - "A Study of Knowledge Engineering Tools in Power Engineering Applications"- IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, Nº4, pp 1825-1832, Nov./94.

Controle MVAr/Tensão

- [80] - HOBSON, E. - "Network Constrained Reactive Control Using Linear Programming" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 99, Nº 3, pp 868, 1980.

- [81] - ALDRICH, J. F.; FERNANDES, R. A.; HAPP, H. H.; WIRGAU, K. A. - "Benefits of Voltage Scheduling in Power Systems" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 99, N° 5, pp 1701, sept/oct/1980.
- [82] - MAMANDUR, K.R.C. - "Emergency Adjustments to VAR Control Variables to Alleviate Over-Voltages, Under-Voltages, and Generator Var Limit Violations" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 101, N° 5, pp 1040, May/1980.
- [83] - CONTAXIS, G.C.; PAPADIAS, B.C.; DELKIS, C. - "Decoupled PowerSystem Security Dispatch" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 102, N° 9, pp 3049, Sept./1983.
- [84] - FRANCHI, L.; INNORTA, M.; MARANNINO, P.; SABELLI, C. - "Evaluation of Economy and/or Security Oriented Objective Functions for Reactive Power Scheduling in Large Scale Systems" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 102, N° 10, pp3481, Oct./1983.
- [85] - MONTICELLI, A. J. - Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Edgard Blücher LTda. São Paulo, 1983.
- [86] - MURTY, P.S.R. - Power Systems Operation and Control - Ed. Mc Graw-Hill, New Delhi, 1984.
- [87] - CHEN, C.S.; CHAN, S.-Y. - "Effects of Voltage Reduction on Distributions Systems" - Electric Power Systems Research, 12(1987), pp 191.
- [88] - FARGHAL, S.A.; ABOU-ELELA, A.A.; AZIZ, M.R.A. - "An Efficient Technique for Real Time Control of System Voltage and Reactive Power" - Electric Power Systems Research, 12(1987), pp 197.
- [89] - BAIDAS, H.M.; SOMUAH, C.B.; OPOKU, G. - "Optimal Corrective Rescheduling for Real and Reactive Power Control" - Electric Power Systems Research, 13 (1987), pp 235.
- [90] - STOTT, B; ALSAÇ, O.; MONTICELLI, A. J. - "Security Analysis and Optimization" - Proc. of IEEE, Vol. 75, N° 12, pp 1623, Dez/87.
- [91] - KIRSCHEN, D. S.; VAN MEETEREN, H. P. - "MW/Voltage Control in a Linear Programming Based Optimal Power Flow" - IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, N° 2, pp 48,1988.

- [92] - REHN, C.J. - "Voltage Optimization using Reduced Augmented Lagrangian Functions and Relaxation Techniques"- PhD Thesis - Royal Institute of Technology - Sweden, 1989.
- [93] - ORTEGA, J. M. - "Determinação de Soluções Corretivas na Operação de Sistemas Elétricos Através de Técnicas de Projeção Ortogonal". Dissertação de MSc, UFSC. Florianópolis, SC, Set./91.
- [94] - COS-ELETROSUL - "Sistema de Despacho em Tempo Real" - Minicurso COS, Curitiba, Set./1991.
- [95] - CHEBBO, A.M.; IRVING, M.R.; STERLING, M.J.H. - "Voltage collapse proximity indicator: behaviour and implications" - IEE Proceedings-C, Vol 139, Nº3, pp 241-252, May/92.
- [96] - CHEBBO, A.M.; IRVING, M.R.; STERLING, M.J.H. - "Reactive power dispatch incorporating voltage stability" - IEE Proceedings-C, Vol 139, Nº3, pp 253-260, May/92.
- [97] - VENKATESH, S.V.; LIU, W.-H.E.; PAPALEXOPOULOS, A.D. - "A Least Squares Solution for Optimal Power Flow Sensivity Calculation" - Trans. on Power Systems, Vol 7, Nº , pp 1394, Aug./1992.
- [98] - SALGADO, R.; SIMÕES COSTA, A.J.A. - "Redespacho Corretivo para o Controle de Tensão e Fluxos de Potência em Sistemas Elétricos" - Anais da Conferência Latino-Americana do IEEE - LATINCON'92, Santiago do Chile, pp 79, Ago/92.
- [99] - MAK, F.K.; ILIC, M.D. - "Classification of voltage problems in electric power systems"- Electrical Power & Energy Systems, Vol. 15, No 6, pp 377-385, 1993.
- [100] - MEDEIROS, A.D.R. - "Soluções Corretivas de Tensão e Fluxos Potência Através de uma Técnica de Mínimos Quadrados"- Dissertação de Mestrado - UFSC, Julho/93.
- [101] - GCOI - Grupo Coordenador da Operação Interligada - "Procedimentos operativos para operação do sistema de suprimento aos estados da região sul em regime normal (IO-21) e de emergência (IO-22)".
- [102] - ABDUL-RAHMAN, K. H.; SHAHIDEHPOUR, S. M. - "Application of Fuzzy Sets to Optimal Reactive Power Planning with Security Constraints" - IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, Nº 2, pp 589-597, May/94.

Confiabilidade

- [105] - WACKER, G.; BILLINGTON, R. - "Customer Cost of Electric Service Interruptions" - Proc. of the IEEE, Vol. 77, N° 6, pp 919-930 - June/89
- [106] - BILLINGTON, R.; KUMAR, S. - "Indices for use in composite generation and transmission system adequacy evaluation" - Electric Power & Energy Systems, Vol 12, No 3, pp 147-155 - July/90.
- [107] - MELO, A.C.G. ET AL. - "Reliability Evaluation of Large Scale Composite Power Systems" - III Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE) - Maio/92.

APÊNDICE A

UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE DIACÓPTICA

Com a utilização de técnicas de diacóptica [A.1] pode-se encontrar a solução do sistema:

$$M\underline{z} = \underline{d} \quad (A.1)$$

a partir da solução de:

$$A\underline{z} = \underline{d} \quad (A.2)$$

onde:

$$M = A + B \quad (A.3)$$

e B representa uma matriz de perturbação.

A complexidade da aplicação da técnica depende do posto de B. Esta técnica está diretamente relacionada com a fórmula da matriz inversa da soma de matrizes [A.2]:

$$(A+B)^{-1} = A^{-1} \{ 1 - B^r [1 + (A^{-1})_r B^r]^{-1} (A^{-1})_r \} \quad (A.4)$$

onde:

A - matriz original, não singular, nxn;

B - matriz de perturbação, nxn, com r colunas não-nulas;

B^r - matriz de ordem nxr, contendo as colunas não-nulas de B;

$(A^{-1})_r$ - matriz com r linhas seleccionadas de A^{-1} , dimensão rxn;

$(A^{-1})_{n-r}$ - matriz de dimensão (n-r)xn, cujos elementos estão contidos em A^{-1} e não em $(A^{-1})_r$;

\underline{z}_r - vetor com r linhas correspondentes às posições das colunas não-nulas em B e

\underline{z}_{n-r} - vetor com (n-r) linhas correspondentes às posições existentes em \underline{z} e não em \underline{z}_r .

O sistema (A.1) pode então ser resolvido pelo seguinte algoritmo:

- 1) Encontrar o vetor \underline{x} : $A\underline{x} = \underline{d}$, ou seja, $\underline{x} = A^{-1}.\underline{d}$.
- 2) Encontrar a matriz $n \times r$ X : $AX = B_r$, ou seja, $X = A^{-1}.B_r$.
- 3) Encontrar o vetor \underline{z}_r : $(1+X_r)\underline{z}_r = \underline{x}_r$, onde X_r e \underline{x}_r se constituem de linhas de X e \underline{x} , correspondentes às variáveis em \underline{z}_r .
- 4) Calcular $\underline{z}_{n-r} = \underline{x}_{n-r} - X_{n-r}.\underline{z}_r$.
- 5) Formar \underline{z} a partir de \underline{z}_r e \underline{z}_{n-r} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [A.1] - AITCHISON, P. W. - "Diakoptics as a General Approach in Engineering" - Journal of Engineering Maths, Nº 21, pp47, 1987.
- [A.2] - HENDERSON, H. V.; SEARLE, S. R. - "On Deriving of a Sum of Matrices" - SIAM Review, Vol 23, Nº 1, pp 53, 1981.

APÊNDICE B

SISTEMAS DE DADOS UTILIZADOS

B1 - DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND 39 BARRAS

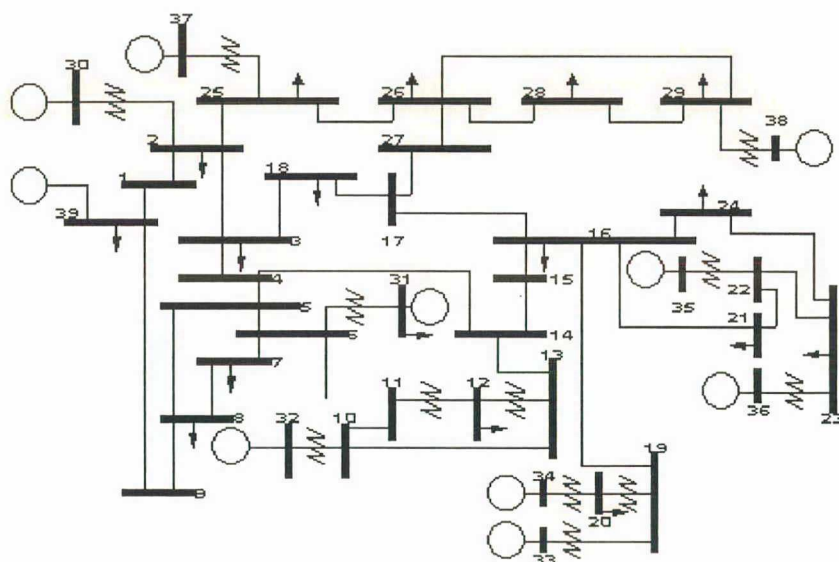


FIGURA B1 - UNIFILAR SISTEMA NEW ENGLAND 39 BARRAS

Tabela B1 - Dados de linhas de transmissão/transformadores

Barra inicial	Barra final	Resist. (R)	Reat. (X)	Bshunt	Tap	Barra Controle
1	2	0.35	4.11	69.87		
1	39	0.10	2.50	75.00		
2	3	0.13	1.51	25.72		
2	25	0.70	0.86	14.60		
2	30		1.81		1.02	2

3	4	0.13	2.13	22.14		
3	18	0.11	1.33	21.38		
4	5	0.08	1.28	13.42		
4	14	0.08	1.29	13.82		
5	6	0.02	0.26	4.34		
5	8	0.08	1.12	14.76		
6	7	0.06	0.92	11.30		
6	11	0.07	0.82	13.89		
6	31		2.50		1.07	6
7	8	0.04	0.46	7.80		
8	9	0.23	3.63	38.04		
9	39	0.10	2.50	120.00		
10	11	0.04	0.43	7.29		
10	13	0.04	0.43	7.29		
10	32		2.00		1.07	10
11	12	0.16	4.35		1.01	11
12	13	0.16	4.35		1.01	12
13	14	0.09	1.01	17.23		
14	15	0.18	2.17	36.60		
15	16	0.09	0.94	17.10		
16	17	0.07	0.89	13.42		
16	19	0.16	1.95	30.40		
16	21	0.08	1.35	25.48		
16	24	0.03	0.59	6.80		
17	18	0.07	0.82	13.19		
17	27	0.13	1.73	32.16		
19	33	0.07	1.42		1.07	19
19	20	0.07	1.38		1.06	19
20	34	0.09	1.80		1.01	20
21	22	0.08	1.40	25.65		
22	23	0.06	0.96	18.46		
22	35		1.43		1.02	22
23	24	0.22	3.50	36.10		
23	36	0.05	2.72		1.00	23
25	26	0.32	3.23	51.3		
25	37	0.06	2.32		1.02	25
26	27	0.14	1.47	23.96		
26	28	0.43	4.74	78.02		
26	29	0.57	6.25	102.90		
28	29	0.14	1.51	24.90		
29	38	0.08	1.56		1.02	29

Tabela B2 - Dados de Barras

Numero	Tipo	Tensão	Potência Gerada		Demanda	
			Ativa	Reativa	Ativa	Reativa
1	PQ					
2	PQ					
3	PQ				322.00	2.40
4	PQ				500.00	184.00
5	PQ					
6	PQ					
7	PQ				233.80	84.00
8	PQ				522.00	176.00
9	PQ					
10	PQ					
11	PQ					
12	PQ				8.50	88.00
13	PQ					
14	PQ					
15	PQ				320.00	153.00
16	PQ				329.40	32.30
17	PQ					
18	PQ				158.00	30.00
19	PQ					
20	PQ				680.00	103.00
21	PQ				274.00	115.00
22	PQ					
23	PQ				247.50	84.60
24	PQ				308.60	92.20
25	PQ				224.00	47.20
26	PQ				139.00	17.00
27	PQ				281.00	75.50
28	PQ				206.00	27.60
29	PQ				283.50	26.90
30	PV		300.00			
31	FOLGA	0.95			9.20	4.60
32	PV	0.95	600.00			
33	PV	0.95	600.00			
34	PV	0.95	540.00			
35	PV	0.95	600.00			
36	PV	0.95	610.00			
37	PV	0.95	540.00			
38	PV	0.95	830.00			
39	PV	0.95	1000.00		1104.00	250.00

B2 - SISTEMA REDUZIDO SUL-SUDESTE 176 BARRAS

Tabela B.3 - Dados de Linhas e Transformadores

Barra Inicial	Barra Final	Resistência	Reatância	Bshunt	Tap	Barra Controlada
16	17	12.78	18.81	10		
21	20		300		1.000	
21	20		300		1.000	
21	20		300		1.000	
22	21		0.100			
44	31	27.92	39.60	620		
44	32	31.39	44.53	699		
33	15		100.10		0.911	
33	15		41.85		0.909	
33	15		106.10		0.909	
32	33	3.92	9.29	170		
35	17		104.27		1.048	
35	18		300		1.000	
35	19		300		1.000	
33	35	10.37	26.34	420		
34	35	10.51	15.47	220		
36	31	4.26	6.04	90		
36	35	4.75	7.65	90		
2	38	1.30	4.66	1250		
8	39	0.55	1.04	20		
41	23		110.67		1.004	
41	24		61.92		0.998	
41	24		66.88		0.998	
41	24		53.53		1.004	
41	39	2.89	5.45	100		
40	41	1.54	3.94	59		
42	22		65.68		0.957	
42	22		84.36		0.957	
36	42	10.82	15.58	239		
37	42	4.75	7.65	90		
43	25		106.27		0.975	
43	42	4.50	10.85	190		
43	42	4.50	10.85	190		
44	13		109.07		0.980	
44	14		67.36		1.031	
45	29		113.60		0.998	
45	29		103.47		0.998	
44	46	15.38	22.15	340		
45	46	1.26	2.75	40		
47	55	0.574	16.63		0.956	
48	56	0.587	14.94		0.956	
50	1		113.33		0.980	

50	1		112.53		0.980	
50	2		104.80		1.000	
50	2		106.40		1.000	
50	2		61.36		1.000	
51	3		104.00		1.000	
51	4		66.80		1.000	
52	9		65.36		0.998	
53	5		65.68		0.998	
53	6		64.96		0.998	
53	6		65.52		0.998	
49	53	0.15	0.12			
50	53	12.52	18.43	270		
53	51	24.65	20.79	260		
54	55	0.276	-1.91		1.004	
54	56	0.268	-1.58		1.004	
52	54	28.81	23.81	310		
53	54	4.27	10.31	180		
53	54	4.27	10.31	180		
74	65		78.70		0.933	
74	66		37.75		0.933	
74	67		38.50		0.933	
75	68		201.20		1.000	
75	69		143.00		1.025	
75	70		142.50		1.025	
76	71		109.07		0.933	
74	76	1.96	7.02	119		
75	76	21.87	41.97	750		
80	82	3.73	5.46	80		
81	82	1.93	4.62	80		
87	90	3.04	8.36	160		
88	90	4.14	11.32	220		
88	90	4.14	11.32	220		
89	90	1.39	2.04	29		
89	90	1.39	2.04	29		
92	94	0.665	11.107		1.000	
93	94	0.491	-0.56		0.944	93
97	98	0.040	0.10			
97	98	0.040	0.10			
99	100	0.599	22.47		1.000	99
101	100	0.370	-0.97		0.942	101
109	113	0.034	4.323		1.000	
110	113	0.034	4.340		1.000	
111	114	0.034	4.365		1.000	
112	114	0.034	4.359		1.000	
119	10		59.15		1.031	10
119	10		59.41		1.031	10
120	28		59.15		1.026	28

121	7		59.71		1.036	7
121	8		40.85		1.029	8
123	57		42.00		1.028	57
123	58		43.05		1.036	58
124	59		58.84		1.036	59
124	60		59.54		1.036	60
125	61		42.05		1.040	61
125	62		41.90		1.034	62
124	125	3.51	5.46	1120		
126	63		47.96		1.035	63
126	64		47.72		1.035	64
127	121	4.592	18.13	4592		
122	127	0.132	0.476	120		
143	128	2.69	11.81	2740		
123	128	0.03	0.08	20		
131	125	0.47	1.71	8630		
132	126	0.075	0.30	2960		
133	72		42.60		1.029	72
133	73		52.24		1.045	73
133	76	1.448	29.424		1.086	76
133	76	1.446	29.607		1.086	76
133	76	1.480	30.229		1.086	76
133	127	0.896	3.229	818		
133	128	2.46	10.48	2500		
134	77		60.16		1.014	77
136	78		34.82		1.001	
136	79		34.82		1.001	
136	82	1.170	33.121		0.989	82
136	82	0.939	16.967		0.989	82
129	136	9.79	24.20	6540		
130	136	18.99	42.67	11190		
136	135	2.78	11.29	3060		
131	137	1.30	4.66	1250		
132	137	1.30	4.66	1250		
133	137	0.58	2.37	650		
133	137	0.58	2.37	650		
134	137	0.45	1.21	290		
137	135	4.50	18.28	4969		
136	137	6.60	26.83	7280		
138	11		59.51		1.031	11
142	98	0.991	31.547		1.012	98
142	98	1.025	32.105		1.012	98
142	98	0.616	18.754		1.012	98
143	142	4.61	18.72	5090		
142	138	4.52	17.91	4880		
139	142	6.04	14.92	4030		
139	142	6.04	14.92	4030		

140	142	0.51	1.28	340		
140	142	0.51	1.28	340		
141	142	2.69	6.91	1720		
143	55	0.317	18.25		1.028	-54
143	56	0.323	18.17		1.028	-54
143	144	0.81	2.61	680		
143	138	1.762	6.134	1694		
143	121	1.57	5.66	1440		
144	12		60.46		1.030	12
145	41		31.36		0.982	41
145	41		31.20		0.982	41
145	41		30.24		0.982	41
145	119	2.75	7.39	1680		
146	43		10.80		1.024	
146	43		9.94		1.024	
146	26		42.50		1.037	26
146	27		41.05		1.036	27
147	30		42.20		1.044	29
147	46		31.16		1.030	45
147	46		32.80		1.034	45
147	120	1.63	5.78	1520		
148	143	4.06	10.49	2580		
148	144	2.90	8.01	2140		
145	148	2.00	6.35	1780		
145	148	2.00	6.35	1780		
146	148	0.08	0.28	80		
146	148	0.08	0.28	80		
147	148	3.27	11.455	9080		
149	83		28.70		1.021	
149	84		28.70		1.021	
136	149	0.824	11.826		0.921	136
136	149	0.841	11.826		0.921	136
150	90	0.286	12.008		1.036	90
150	90	0.286	12.008		1.036	90
150	90	0.962	50.337		1.032	90
150	90	0.923	50.304		1.032	90
165	150	0.897	4.637	7980		
165	150	0.940	4.842	8349		
151	91	0.29	11.995		1.082	91
151	91	0.29	11.995		1.082	92
153	150	3.854	19.936	34320		
151	153	3.37	12.500	22840		
153	152	1.217	6.180	10980		
154	94	0.195	4.600		1.000	
154	95	0.203	9.262		1.025	95
154	96	0.196	9.193		1.025	
152	154	3.739	18.99			

153	154	4.601	23.768			
155	100	0.143	14.510		0.948	
101	155	0.811	12.541		0.950	101
101	155	0.514	12.384		0.950	101
101	155	0.509	12.115		0.950	101
154	155	1.503	7.776	13390		
154	155	1.505	7.776	13400		
156	155	1.510	7.732	13570		
108	158	0.798	12.32		0.953	158
108	158	0.573	12.36		0.953	158
159	102		6.957		1.025	
159	103		6.957		1.025	
159	104		6.957		1.025	
159	105		6.957		1.025	
159	106		6.957		1.025	
159	107		6.957		1.025	
159	155	3.074	15.885	27380		
159	156	1.629	8.344	14640		
157	159	3.429	17.781	30550		
157	159	3.434	17.771	30610		
160	161	2.460	12.652	21710		
160	159	3.041	15.718	27089		
1600	159	3.045	15.738	27120		
158	161	0.908	4.708	8080		
162	161	2.21	11.475	19690		
162	164	1.895	9.704	17030		
162	164	1.892	9.776	16840		
137	163	1.107	13.104		0.950	137
137	163	1.442	11.810		0.950	137
149	163	2.280	11.828	20309		
142	164	0.825	12.661		0.965	142
142	164	0.767	12.721		0.922	142
142	164	0.765	12.637		0.922	142
142	164	0.957	12.589		0.922	142
165	85				1.050	
165	86				1.050	
149	165	0.014	0.074	130		
148	166	0.564	6.035		0.950	148
148	166	0.348	6.283		0.950	148
148	166	0.809	12.625		0.950	148
148	166	0.809	12.529		0.950	148
166	163	2.532	13.132	22550		
166	164	1.280	6.567	11520		
166	164	1.267	6.571	11210		
166	165	3.741	19.359	32280		
115	167	0.039	1.207		1.002	115
168	171	0.154	1.940	236970		

168	167	0.110	1.394	170340		
169	168	0.159	2.012	245770		
160	169	0.031	1.207		0.940	160
170	116		4.200		1.024	170
170	117		4.200		1.024	170
170	118		4.200		1.024	170
168	170	0.050	0.650	80490		
171	170	0.050	0.700	85750		
171	113	0.016	0.101		1.000	
171	114	0.016	0.097		1.000	
173	172	0.245	3.092	377740		
169	173	0.162	2.048	250170		
174	171	0.172	2.170	265160		
172	174	0.315	3.977	485720		
173	174	0.097	1.223	150460		
162	175	0.031	1.166		0.945	164
162	175	0.032	1.163		0.945	164
169	175	0.216	2.733	333860		
169	175	0.236	2.975	363370		
166	176	0.031	1.152		0.945	168
176	175	0.127	1.603	195900		

Tabela B4 - Dados de Barras

Índice	Tipo	Nome	Tensão	Geração		Demanda		Q _{reat.}
				Ativa	Reat.	Ativa	Reat.	
1	PQ	CAMB. 24				2.10	1.03	
2	PQ	CAMB.13.8				3.10	1.79	3.0
3	PQ	PIÇAR2 13.8				0.65	0.31	
4	PQ	PIÇAR1 13.8				1.20	0.58	
5	PQ	IT.SAL.T3-24				2.34	1.31	1.8
6	PQ	ISS-TT1,2 24				5.95	3.10	1.8
7	PQ	ITAJAI2 13.8				1.10	0.17	
8	PQ	ITAJAI2 24				2.03	1.34	
9	PQ	BRUSQUET124				2.96	0.96	2.4
10	PQ	BQE-TT2,3-24				9.77	3.89	4.8
11	PQ	PIÇAR. 13.8						
12	PQ	GASPAR 24				3.10	1.44	
13	PQ	IBIRAMAT2 24				0.52	0.24	
14	PQ	IBIRAMAT1 24				1.79	0.83	3.0
15	PQ	TIMBO-24				6.36	2.6	
16	PV	US.CEDROS 24	0.950	7.3	4.5	0.03	0.03	
17	PQ	US.PALMEI 24		.				
18	PV	US.PALMEI G2	1.000	8.6	-2.6			
19	PV	US.PALMEI G1	1.000	8.6	-2.6			
20	PV	US. SALTO 8.5	1.000	3.4	4.5			
21	PQ	US. SALTO 24						

22	PQ	BL. SALTO 24				9.60	3.47	4.8
23	PQ	BL.GARC.T8-24				1.00	0.72	
24	PQ	BL.GARCIA 24				1.00	2.96	1.2
25	PQ	BLUM.2 13.8				0.62	0.48	
26	PQ	BLUM.2-T2 24				1.82	0.52	2.4
27	PQ	BLUM.2-T1 24				2.17	0.65	2.4
28	PQ	TROMBUDO 24				1.72	0.96	
29	PQ	RIO DO SUL 24				1.93	0.86	
30	PQ	RIOSUL-2-24				3.44	0.89	2.4
31	PQ	TEKA 69				1.55	0.86	
32	PQ	INDAIAL-B 69						
33	PQ	TIMBO 69						
34	PQ	C.VOLTA-GR69				0.28	0.10	
35	PQ	US.PALMEI 69						
36	PQ	INDAIAL-B 69						
37	PQ	FIOV/KARS. 69				2.75	1.38	
38	PQ	ALTONA 69				1.38	0.68	
39	PQ	CREMER 69				2.17	1.00	
40	PQ	ARTEX 69				2.41	1.31	
41	PQ	BL. GARCIA 69						
42	PQ	BL. SALTO 69						
43	PQ	BLUM.2 69						
44	PQ	IBIRAMA 69						
45	PQ	RIO DO SUL 69						
46	PQ	RIOSUL2 69						
47	PV	ILHOTA2-13	0.959		-5.0	0.17	0.07	
48	PV	ILHOTA1-13	0.960		-5.0	0.17	0.07	
49	PQ	CCCP 69				1.17	0.41	
50	PQ	CAMB. 69						
51	PQ	PIÇAR. 69						
52	PQ	BRUSQUE 69						
53	PQ	ITAJ. SALS. 69						
54	PQ	ILHOTA 69						
55	PQ	ILHOTA B00						
56	PQ	ILHOTA A00						
57	PQ	TIJUCAST3 24				3.44	2.06	
58	PQ	TIJUCAST2 24				1.20	0.34	
59	PQ	INE.TT2 13.8				1.34	0.96	
60	PQ	INE.TT1 13.8				1.38	0.89	
61	PQ	TRIN.T2 13.8				2.75	1.72	1.2
62	PQ	TRIN.T1 13.8				3.03	1.89	
63	PQ	ICO.TT2 13.8				1.89	1.03	
64	PQ	ICO.TT1 13.8				2.75	1.20	
65	PQ	COQUE.T3 13.8				2.06	1.03	
66	PQ	COQUE.T2 13.8				1.55	0.86	
67	PQ	COQUE.T1 13.8				1.55	0.86	
68	PQ	USGARCIA13.8				0.14	0.07	

69	PV	US.GARC.6- 9B	0.971	4.4	2.0			
70	PV	US.GARC.6- 9A	0.971	4.4	2.0			
71	PQ	ROCA.T6 13.8				0.69	0.34	
72	PQ	ROCA.T5 13.8				3.78	2.41	
73	PQ	ROCA.T4 13.8				3.44	2.75	3.0
74	PQ	COQUEIROS69						
75	PQ	US.GARCIA 69						
76	PQ	FLORIANO. 69						
77	PQ	PALHOÇA 13.8				2.96	2.06	2.4
78	PV	J.LACERDA62	1.000			0.43	0.21	
79	PV	J.LACERDA61	1.000	25	-12	0.43	0.21	
80	PQ	TUBA.FICT 69				3.44	1.88	
81	PQ	TUBARÃO 69				7.75	5.01	
82	PQ	J.LACERDA 69						
83	PV	J.LACERDA64	1.000			0.57	0.28	
84	PV	J.LACERDA63	1.000	33	-4.7	0.57	0.28	
85	PV	J.LACERDB 66	0.950			1.38	0.69	
86	PV	J.LACERDB 65	0.950	80	9.1	1.38	0.69	
87	PQ	CRICIUMA2-69				3.10	1.59	
88	PQ	CRICIUMA 69				21.80	8.21	
89	PQ	SIDER.CEL.69				8.38	3.30	
90	PQ	SIDEROP 69						
91	PQ	CHARQUE. 69				11.70	5.16	
92	PQ	PFUNDO-T13				0.17	0.07	
93	PQ	PFUNDO 138				4.82	1.38	
94	PQ	PFUNDO-T00						
95	PV	PFUNDO2-G13	0.988	70	-15.3			
96	PV	PFUNDO1-G13	0.970	70	-15.3			
97	PQ	JVILLE1-69				12.84	2.04	
98	PQ	JOINVILLE1 69						
99	PQ	XANXERE-13						
100	PQ	XANXERE-00						
101	PQ	XANXERE 138				59.93	1.05	
102	PV	S.OSORIO-G6	1.000		-31.2	1.14		
103	PV	S.OSORIO-G5	1.000		-31.2	1.14		
104	PV	S.OSORIO-G4	1.000	125	-15.6	0.10		
105	PV	S.OSORIO-G3	1.000	125	-15.6	0.10		
106	PV	S.OSORIO-G2	1.000	125	-15.6	0.10		
107	PV	S.OSORIO-G1	1.000	125	-15.6	0.10		
108	PQ	CANOIN. 138				22.08	-5.10	
109	PV	S.SANTG1-19	0.950		-79.4	1.69		
110	PV	S.SANTG1-19	0.950	300	-57.8	0.21		
111	PV	S.SANTG1-19	0.950	300	-57.9	0.21		
112	PV	S.SANTG1-19	0.950	300	-58.1	0.21		
113	PQ	S.SANTG1-B00						
114	PQ	S.SANTG1-A00						
115	PQ	LONDRI-E-230				89.58	-7.48	

116	PV	S.SEGRED-3GR	1.000	98.5	4.5	0.51		
117	PV	S.SEGRED-3GR	1.000	98.5	4.5	0.51		
118	PV	S.SEGRED-3GR	1.000	98.5	4.5	0.51		
119	PQ	BRUSQUE-138						
120	PQ	TROMBU.-138						
121	PQ	ITAJAI2 138						
122	PQ	BIGUAÇU 138						
123	PQ	TIJUCAS 138						
124	PQ	IL.NORTE 138						
125	PQ	TRINDADE 138						
126	PQ	IL.CENTRO 138						
127	PQ	EBIGUAÇU 138						
128	PQ	TIJUCAS 138						
129	PQ	SJOAQUIM 138				3.97	0.73	
130	PQ	VIDAL R.J.138				3.32	1.88	
131	PQ	COQUEIR1. 138						
132	PQ	COQUEIR1. 138						
133	PQ	FLORIAN. 138						
134	PQ	PALH.CEL. 138						
135	PQ	IMBITUBA 138				3.51	-1.83	
136	PQ	JLACERDA 138						
137	PQ	PALHOÇA 138						
138	PQ	PIÇARR. 138						
139	PQ	SBENTO 138				-11.9	-15.1	
140	PQ	JVILLE 4-138				36.63	23.03	
141	PQ	E. WEG-138				6.33	2.11	
142	PQ	JOINVILL 138				8.40	1.96	
143	PQ	ILHOTA 138						
144	PQ	GASPAR 138						
145	PQ	BL.GARC. 138						
146	PQ	BLUMEN2 138						
147	PQ	RIOSUL2 138						
148	PQ	BLUMEN. 138						
149	PQ	JLACERDA 230				0.45		
150	PQ	SIDEROP. 230						
151	PQ	CHARQUE. 230				-29.40	27.05	
152	PQ	NPRATA-CE230				6.19	3.10	
153	PQ	FARROUP. 230				-16.1	-16.2	
154	PQ	PFUNDO 230				33.71	7.2	
155	PQ	XANXERE 230						
156	PQ	PBRANCOS230				-4.1	18.0	
157	PQ	CMOURAO 230				24.54	2.73	
158	PQ	CANOINH. 230						
159	PQ	S.OSORIO 230				47.25	-17.7	
160	PQ	AREIA 230				40.13	-3.19	
161	PQ	SMATEUSE 230				6.19	2.75	
162	PQ	CURITIBA 230				113.7	44.9	

163	PQ	PALHOÇA 230						
164	PQ	JOINVILL 230						
165	PQ	JLACERDB 230						
166	PQ	BLUMEN. 230						
167	PQ	LONDRINA 500						
168	REF.	IVAIPORA 525	0.970	999.0		1.07		
169	PQ	AREIA 525				-253.0	373.3	
170	PQ	S.SEGREDO525						
171	PQ	S.SANTIAG.525				1.62		
172	PQ	GRAVATAI 525				256.3	-54.01	-300
173	PQ	C.NOVOS 525				0.8		-200
174	PQ	ITÁ 525						-300
175	PQ	CURITIBA 525				1.51		-300
176	PQ	BLUMEN. 525				0.55		

B.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS PERÍODOS DE CARGA

A classificação dos períodos de carga apresentada na Tabela B1 é a utilizada pela ELETROSUL para o período de março a maio.

Tabela B5 - Período de Carga

Tipo de Carga	Horário			
	Segundas Domingos/Feriados	Terças a Sextas	Sábados	
Pesada	18 - 22	18 -22	18 - 22	-
Média	07 - 18 / 22 - 24	07 - 18 / 22 - 24	07 - 18 / 22 - 24	18 - 23
Leve	-	00 - 07	00 - 07	00 - 06 / 10 - 18 / 23 - 24
Mínima	00 - 07	-	-	06 - 10